



Treball Fi de Carrera

**Enginyeria Tècnica de Telecomunicació  
Especialitat en Sistemes Electrònics**

---

# Anàlisi i tècniques de processat del senyal per a la generació de mapes eòlics

Carme Martínez Domingo

---

Director: Jose A. López-Salcedo

Departament de Telecomunicació i Enginyeria de Sistemes

**Escola Tècnica Superior d'Enginyeria (ETSE)  
Universitat Autònoma de Barcelona (UAB)**

Setembre 2009





El tribunal d'avaluació d'aquest Treball Fi de Carrera, reunit el dia \_\_\_\_\_, ha acordat concedir la següent qualificació:

--

President:

Vocal:

Secretari:



El sotasignant, Jose A. López Salcedo, Professor de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria (ETSE) de la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB),

CERTIFICA:

Que el treball presentat en aquesta memòria de Treball Fi de Carrera ha estat realitzat sota la seva direcció per l'alumne Carme Martinez Domingo.

I, perquè consti a tots els efectes, signa el present certificat.

Bellaterra, 4 de setembre de 2009.

Signatura: Jose A. López Salcedo

## Resum

### Català

L'emplaçament del projecte es situa a un parc eòlic marítim, on es vol observar el vent a través del radar VAD, Velocity Azimuth Display, per poder controlar la velocitat de rotació dels aerogeneradors, i poder substituir els actuals anemòmetres. No ens centrarem amb el control d'aquest, sinó que l'objectiu principal d'aquest projecte és analitzar el funcionament i processat de dades del VAD. Es proposarà, simularà i estudiarà noves tècniques d'estimació espectral per obtenir una millora important amb les mesures de velocitat, direcció i divergència del vent, per tant construir un radar més robust a pertorbacions. A més a més, també il·lustrarem mapes eòlics obtinguts a partir de tot el processat.

### Castellano

La ubicación del proyecto se sitúa en un parque eólico marítimo, donde se quiere observar el viento a través del radar VAD, Velocity Azimuth Display, para poder controlar la velocidad de rotación de los aerogeneradores, y poder sustituir los actuales anemómetros. No nos centraremos con el control de estos, sino que el objetivo principal de este proyecto es analizar el funcionamiento y el procesamiento de datos del VAD. Se propondrán, simularán y estudiarán nuevas técnicas de estimación espectral para obtener una mejora importante de las medidas de la velocidad, dirección y divergencia del viento, por lo tanto construir un radar más robusto a perturbaciones. Además, también se ilustran mapas eólicos obtenidos a partir de todo el procesado.

### English

The location of the project is in a offshore wind farm, where it is possible to observe the wind through the VAD (Velocity Azimuth Display) radar, in order to control the rotation speed of the wind turbine and replace the current anemometers. We are not going to concentrate in the control of the wind turbine, but the aim of this project is to analyse the starting up and processing of the VAD radar. There will be proposed, simulated and studied new techniques for spectrum estimation in order to obtain a substantial improving in speed measuring, direction and wind divergence, so as to build a sturdier radar to disturbances. Moreover eolic maps obtained from the processing will be provided.

# Índex

<b>Resum .....</b>	<b>V</b>
Català.....	V
Castellano .....	V
English .....	V
<b>Llista d'Acrònims .....</b>	<b>VIII</b>
<b>Índex de Figures.....</b>	<b>IX</b>
<b>Índex de Taules.....</b>	<b>XI</b>
<b>Capítol I: Introducció al projecte.....</b>	<b>1</b>
1.1 Introducció i objectius.....	1
1.2 Background.....	1
1.3 Situació actual .....	2
1.4 Motivació.....	2
1.5 Estructura del projecte.....	3
<b>Capítol II: Meteorologia .....</b>	<b>4</b>
2.1 Característiques generals de l'atmosfera.....	4
2.1.1 Moviment atmosfèric.....	5
2.1.1.1 El moviment horitzontal.....	5
2.2 Mapes meteorològics .....	8
2.2.1 Models deterministes .....	8
2.2.2 Models probabilístics .....	10
<b>Capítol III: Doppler Radar .....</b>	<b>11</b>
3.1 Classificació de radars .....	11
3.2 Freqüència Doppler .....	12
3.3 Estructura del radar.....	16
3.3.1 Senyal del radar.....	17
3.4 El nostre cas: VAD .....	17
3.4.1 Funcionament .....	18
3.4.2 Extracció de la velocitat .....	19
3.4.3 Especificacions del WSR-88D .....	21
3.4.4 Observacions Meteorològiques (Dades Reals) .....	22
<b>Capítol IV: Determinació de les propietats cinètiques a partir del Radar Doppler .....</b>	<b>27</b>
4.1 Relació entre les propietats del vent amb el VAD.....	27

4.2 Limitacions del VAD.....	36
4.2.1 Aliasing .....	37
<b>Capítol V: Mètodes i Algoritmes .....</b>	<b>38</b>
5.1 Obtenció de paràmetres aleatoris .....	38
5.2 Estimació espectral.....	41
5.2.1 Mètodes No Paramètrics .....	41
5.2.1.1 Periodograma.....	41
5.2.1.2 Bartlett .....	42
5.2.1.3 Blackman-Tukey .....	42
<b>Capítol VI: Simulacions i verificació de les dades .....</b>	<b>43</b>
6.1 Simulacions.....	43
6.1.1 Diagrama del processat de dades .....	43
6.1.2 Caracterització del canal .....	45
6.1.2.1 Model estadístic de distribució de la velocitat del vent .....	45
6.1.2.2 Distribució de Weibull.....	46
6.1.2.2.1 Determinació dels paràmetres de forma i escala .....	46
6.1.3 Simulació en diferents entorns .....	49
6.1.3.1 Vent Horitzontal Lineal.....	49
6.1.3.2 Vents de Pura Divergència .....	56
6.1.3.3 Vents de Translació i Divergència .....	62
6.1.4 Representació gràfica dels mapes eòlics.....	69
<b>Capítol VII: Conclusions .....</b>	<b>74</b>
7.1 Conclusió de les simulacions .....	79
<b>Referències.....</b>	<b>80</b>

## Llista d'Acrònims

AR	Autoregressive process
CW	Continuous Wave
FIR	Finite length Impulse Response
IIR	Infinite length Impulse Response
MOPA	Master Oscillator and Power Amplifier
PR	Pulsed Radar
PRF	Pulse Repetition Frequency
PRI	Pulse Repetition Interval
SNR	Signal to Noise Ratio
STALO	Stabilized Local Oscillator
TF	Transformada de Fourier
VAD	Velocity Azimuth Display
WSS	Wide-Sense Stationary process



# Índex de Figures

Figura 1-Capes de l'atmosfera.....	5
Figura 2- L'efecte de Coriolis .....	6
Figura 3-Moviment al voltant de centres de baixa o alta pressió.....	6
Figura 4-Moviments verticals de l'aire associats als centres de baixa i alta pressió.....	7
Figura 5- Mapa de pressió .....	8
Figura 6-Mapa de direcció i mòdul del vent .....	8
Figura 7-Mapa de precipitació.....	9
Figura 8-Mapa de humitat relativa .....	9
Figura 9-Mapa probabilístic .....	10
Figura 10-Efecte de les ones reflectides d'un objecte amb moviment.....	12
Figura 11-Polsos del radar.....	13
Figura 12-Efecte als polsos d'un radar degut a un objecte amb moviment.....	14
Figura 13-Espectre del senyal que rep el radar.....	15
Figura 14- Diagrama simplificat d'un radar Doppler.....	16
Figura 15- Potència dispersada pels aerosols .....	17
Figura 16- Velocitat radial.....	18
Figura 17- Vista de la configuració del radar Doppler.....	18
Figura 18- Radi d'escaneig del radar.....	19
Figura 19- Tren de polsos que envia el radar .....	19
Figura 20- Diagrama del bloc d'anàlisi de la velocitat.....	20
Figura 21- Espectre del senyal enviada pel radar .....	20
Figura 22- Espectre del senyal rebuda pel radar.....	21
Figura 23-Diagrama del WSR-88D.....	21
Figura 24-Distorsió dels anemòmetres .....	22
Figura 25- A dalt, velocitat radial observada a l'any 2003, a baix, la velocitat radial en funció de l'angle azimuth a una distància de 3 km.....	23
Figura 26-Efecte de les turbulències a la velocitat radial.....	24
Figura 27- Mapa de vent obtingut pel radar WSR-88D, a l'any 2005 durant un huracà, amb un angle d'elevació de 0,5 graus.....	25
Figura 28- Mapa de la direcció i velocitat radial extret radar VAD a l'any 2002 a una alçada de 0,5 Km per sobre del nivell del mar .....	25
Figura 29- Mapa de la direcció (esquerra) i velocitat radial (dreta) extrems del radar VAD l'any 2002 .....	26
Figura 30- Velocitat i direcció del vent en funció de la distància .....	26
Figura 31- Divergència en funció de la distància.....	26
Figura 32-Estructura del radar VAD .....	28
Figura 33-Representació de la sèrie de Fourier .....	31
Figura 34- Cas 1 Vent horitzontal .....	31
Figura 35- Cas 2 Vent horitzontal .....	32
Figura 36- Vent amb divergència zero .....	33
Figura 37- Vent divergent .....	34
Figura 38- Dos tipus de camps de vent i la seva corresponent velocitat radial.....	35
Figura 39- Velocitat radial obtinguda amb atmosfera tranquil·la i amb turbulències....	36

Figura 40- Angles permissius del radar VAD en cas de pluja o neu.....	36
Figura 41- Velocitat màxima Doppler.....	37
Figura 42- Filtre.....	38
Figura 44- Ample de Banda del filtre IIR.....	40
Figura 43-Filtre IIR .....	40
Figura 45- Bloc software .....	43
Figura 46-Vectors de velocitat .....	44
Figura 47- Bloc Generador de Senyal .....	44
Figura 48- Vectors resultants del bloc Generador de Senyal .....	45
Figura 49- Funció Weibull .....	46
Figura 50- Distribució de la velocitat del vent a 62 metres per sobre del nivell del mar, al parc eòlic marítim de Horns Rev .....	47
Figura 51- Distribució de la velocitat del vent amb diferents valors del paràmetre k, al parc eòlic marítim de Horns Rev .....	47
Figura 52- Vent Horitzontal Lineal .....	49
Figura 53- Velocitat radial pel primer escenari .....	50
Figura 54- Velocitat radial amb soroll pel primer escenari .....	50
Figura 55- Velocitat radial pel segon escenari .....	53
Figura 56- Velocitat radial amb soroll pel segon escenari .....	54
Figura 57- Vent Divergent.....	56
Figura 58- Velocitat radial pel primer escenari .....	57
Figura 59- Velocitat radial amb soroll pel primer escenari .....	57
Figura 60- Camp divergent.....	58
Figura 61- Divergència del camp .....	58
Figura 62- Velocitat radial pel segon escenari .....	60
Figura 63- Velocitat radial amb soroll pel segon escenari .....	60
Figura 64- Velocitat radial pel primer escenari .....	62
Figura 65- Velocitat radial amb soroll pel primer escenari .....	63
Figura 66- Velocitat radial amb soroll pel segon escenari .....	65
Figura 67- Mapa de la direcció del vent.....	69
Figura 68- Mapa de la direcció del vent.....	70
Figura 69- Mapa de la direcció del vent.....	71
Figura 70- Mapa de la direcció del vent.....	71
Figura 71- Mapa de la velocitat per cada radi .....	72
Figura 72- Mapa de la velocitat per cada radi .....	72
Figura 73- Mapa de la direcció i velocitat en funció del radi.....	73
Figura 74- Mapa de la direcció i velocitat en funció del radi.....	73
Figura 75- Velocitat del vent horitzontal per diferents mètodes .....	75
Figura 76- Velocitat del vent divergent per diferents mètodes .....	77
Figura 77- Velocitat del vent divergent i horitzontal per diferents mètodes .....	78

## Índex de Taules

Taula 1-Bandes de freqüència .....	12
Taula 2-Comparació de la velocitat i direcció del vent extret pel radar WSR-88D i l'algoritme del radar VAD.....	24
Taula 3- Factors d'escala i forma mesurats a Hvide Sande i a Horns Rev a 62 metres sobre el nivell del mar .....	48
Taula 4- Velocitats per els diferents mètodes amb una SNR alta .....	74
Taula 5- Velocitats per els diferents mètodes amb una SNR baix .....	75
Taula 6- Divergència per els diferents mètodes amb una SNR alta .....	76
Taula 7- Divergència per els diferents mètodes amb una SNR baix .....	76
Taula 8- Velocitat i divergència per els diferents mètodes amb una SNR alta .....	77
Taula 9- Velocitat i divergència per els diferents mètodes amb una SNR baixa .....	78

## Capítol I: Introducció al projecte.

### 1.1 Introducció i objectius

Aquest projecte aborda uns dels temes de les ciències de la natura i de telecomunicacions de més actualitat al final del segle XX. El projecte està centrat en l'obtenció i processament de dades procedents del radar VAD, Velocity Azimuth Display, situat en un entorn marítim, en concret, a parcs eòlics marítics. S'utilitzen estimadors espectrals per determinar la direcció, velocitat i divergència del vent. El nostre objectiu és simular aquest entorn marí i fer-ne els corresponents mapes eòlics. Es simulen tres tipus de vents: només amb component horitzontal, divergents i la combinació dels dos. A més a més, s'implementa diferents estimadors no paramètrics per estudiar quins d'aquests afegeix una millora de la precisió de mesura ja que el número de mostres per processar és finit i petit. L'estimador més usat, a diferents estudis, és la Transformada de Fourier. Els estimadors, objectius del nostre estudi, són: Periodograma, Bartlett i Blackman-Tukey dintre de la branca dels no paramètrics.

### 1.2 Background

L'energia eòlica és una font d'energia elèctrica neta. A diferència d'altres fonts, no emet  $\text{CO}_2$  ni altres contaminants atmosfèrics ni tampoc residus. L'energia eòlica, és una energia renovable, inesgotable i, present a tots els països del món. El Govern de Catalunya ha publicat, aquest any, un mapa eòlic per aclarir a on es poden situar els nous parcs eòlics offshore. No s'ha desenvolupat fins ara cap projecte eòlic offshore degut a la inexistència d'un marc legal. Ara, una vegada presentat aquest estudi les empreses ja podran presentar els seus projectes al Ministeri de Indústria. Al litoral català, de moment, no hi ha cap projecte d'instal·lació eòlica al mar.

Espanya és la tercera potència mundial en energia eòlica instal·lada. No obstant, tots els aerogeneradors estan situats a terra, cosa que no succeeix a altres països d'Europa. A la UE hi ha instal·lats 1.471 MW, repartits per Gran Bretanya (590 MW), Dinamarca (409 MW) i Holanda (358 MW). Des de l'1 de desembre del 2008 s'ha creat 202.126 GW i s'ha deixat d'emetre 121.304.535 tones de  $\text{CO}_2$ .

### 1.3 Situació actual

Un repte pels científics és avaluar els models de predicció de vent a una certa alçada sobre el nivell del mar per millorar el disseny de les turbines dels aerogeneradors.

A les últimes dècades, per mesurar el vent entre els 70 i 270 metres d'alçada s'ha utilitzat un masteler meteorològic, però és extremadament car. El masteler es col·loca a on es vol estudiar el recurs eòlic de la zona per veure si és viable o no implementar aerogeneradors. Consta de diferents anemòmetres (aparell que mesura la velocitat del vent), sensors de temperatura, distribuïts per tot el masteler, d'humitat i de pressió. Un cop instal·lat el masteler i fetes les mesures si la zona no és adequada es queda al mar sense cap mena de funció.

Una solució interessant és utilitzar tecnologia Radar, per fer unes observacions acurades del vent a alçades elevades. Els avantatges d'aquests instruments són molts: cost raonable, un gran abast, ràpid alhora d'instal·lar i desarmar, a part de la gran precisió envers els anemòmetres.

Cada aerogeneradors té diferents anemòmetres, l'objectiu de col·locar aquest instrument és per observar la velocitat de vent. Les turbines dels aerogeneradors poden funcionar fins a una certa velocitat de rotació perquè a velocitats molt grans es podrien malmetre i cada generador té un cost elevadíssim.

### 1.4 Motivació

La motivació d'aquest projecte és implementar tecnologia Radar als parcs eòlics marítics. La substitució del masteler per un radar aportaria més precisió a les mesures, i més prestacions. Aquesta idea sorgeix també perquè els mapes actuals de vent al mar estan creats a partir de satèl·lits, com és el SAR (Synthetic Aperture Radar). La utilització d'un satèl·lit radar eleva moltíssim el cost d'investigació d'una zona eòlica. A més a més, hi ha zones del món que no són visibles pel satèl·lit SAR. Amb totes aquestes raons, s'ha proposat aquesta tecnologia per ser més autònoms, obtenir mapes eòlics i alhora abaratir costos.

La incorporació d'un radar, permet fer mesures a diferents alçades i a una gran distància, podent observar distàncies de fins 50 km.

La quantitat de radars a un parc eòlic seria d'un, de manera que pot controlar tots els aerogeneradors. A més a més proporcionaria mapes de vent complets de tota una zona marítima d'interès, també, per a activitats marítimes.

## 1.5 Estructura del projecte

El projecte s'estructura de la següent manera: al 2on capítol s'explica conceptes bàsics de meteorologia, tipus de mapes, etc., per tenir un coneixement mínim del entorn. Al capítol 3er es tracta els radars, s'explica els diferents tipus de radars, el seu funcionament, la seva estructura i en concret el radar VAD utilitzat en aquest projecte. Al capítol 4rt es determinen les propietats cinètiques del vent a partir del radar Doppler. L'estudi dels mètodes paramètrics es desenvolupa al capítol 5è. Les diferents simulacions del software MATLAB utilitzat per representar mapes eòlics es troben al capítol 6è igual que els mapes reals extrets pel radar WSR-88D. S'acaba el projecte amb les conclusions dels diferents mètodes al capítol 7è.

## Capítol II: Meteorologia

### 2.1 Característiques generals de l'atmosfera

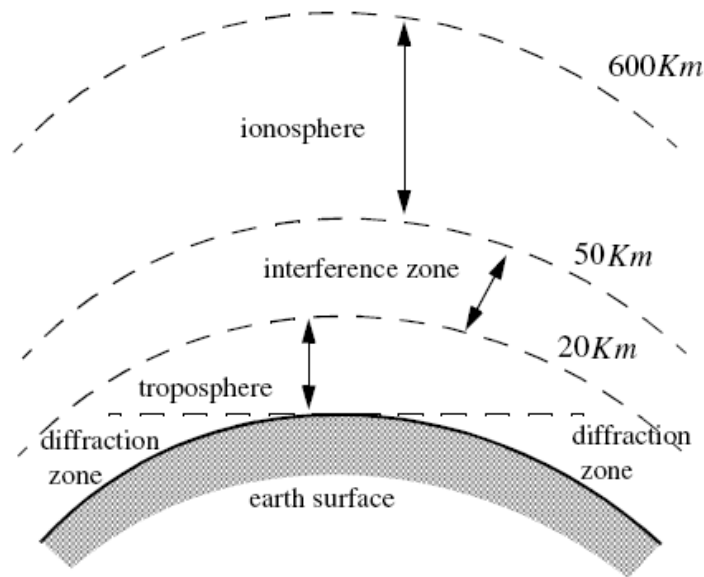
L'atmosfera és una capa gasosa que envolta la superfície de la Terra. Té una densitat màxima sobre la superfície i decreix gradualment amb l'altura fins que es fa indistingible amb el gas interplanetari. La seva composició química, estructura física i dinàmica varien amb l'altura en funció de l'atracció gravitatòria, els processos biogeoquímics i la incidència de la llum solar.

La primera classificació, basada en la composició química, divideix l'atmosfera en dues capes: l'*homosfera* i l'*heterosfera*. La primera es situa per sota els 100 Km, té una composició química constant a causa de la barreja que produeixen les turbulències; la segona situada per sobre dels 100 Km consta d'una composició química variada pel fet que no es produeix aquesta mescla i també per causa de les condicions de pressió i temperatura.

La divisió de l'atmosfera en funció de la variació de temperatura és important. Es diferencien quatre capes: *troposfera*, *estratosfera*, *mesosfera* i *termosfera*:

- ❖ La troposfera és la capa que està en contacte amb la superfície. S'estén fins a uns 10 Km. En aquesta tenen lloc els núvols i la precipitació. A causa de les diferències d'escalfament i la disminució de la temperatura amb l'altura, es produeixen moviments horitzontals i verticals.
- ❖ L'estratosfera, per sobre de l'anterior, s'estén fins als 50 Km d'altura. En aquesta regió la temperatura augmenta amb l'altitud, per aquesta causa hi ha dificultat de moviment vertical.
- ❖ La mesosfera, precedida per l'estratosfera, arriba fins als 90 Km d'altitud. En aquesta capa la temperatura disminueix amb l'altura.
- ❖ La termosfera ve donada pel límit superior de la mesosfera. La temperatura pot arribar als  $2000^{\circ}\text{C}$  durant el dia.

A part dels compostos gasosos i l'aigua, a l'atmosfera existeixen partícules líquides i sòlides en suspensió, anomenat aerosol atmosfèric. El radi d'aquestes partícules oscil·len entre els  $10^{-3} \mu\text{m}$  i els  $100 \mu\text{m}$ . En concret, les partícules líquides que constitueixen l'aerosol marí tenen molta importància. Incorporen una gran varietat de compostos orgànics, procedents de la descomposició del plàncton, les algues i inorgànics (fòsfor, magnesi, potassi...).



**Figura 1-Capes de l'atmosfera**

### 2.1.1 Moviment atmosfèric

La major part dels processos físics que tenen lloc a la nostra atmosfera són el resultat de l'autoregulació que realitza per tractar de reduir les grans diferències que resulten de la distribució irregular de l'energia, la humitat i la pressió del planeta.

La diferència de temperatura entre els pols i l'equador proporciona l'energia necessària per la circulació atmosfèrica.

#### 2.1.1.1 El moviment horitzontal

La component horitzontal de la força bàrica, la força de Coriolis i la de fregament actuen al pla horitzontal i donen lloc al moviment horitzontal de l'aire, és a dir, el vent.

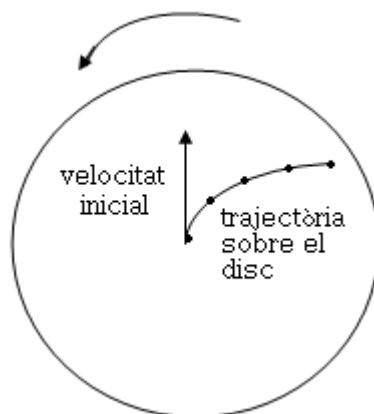
##### ❖ Gradient horitzontal de pressió:

La formació d'un gradient horitzontal de pressió qualsevol provoca un estat de desequilibri momentani que dóna lloc al moviment accelerat de l'aire, és a dir, provoca l'aparició de vent. Pot aparèixer per causes mecàniques (divergència o convergència) o tèrmiques (expansió o compressió de l'aire) .



### ❖ Força de Coriolis:

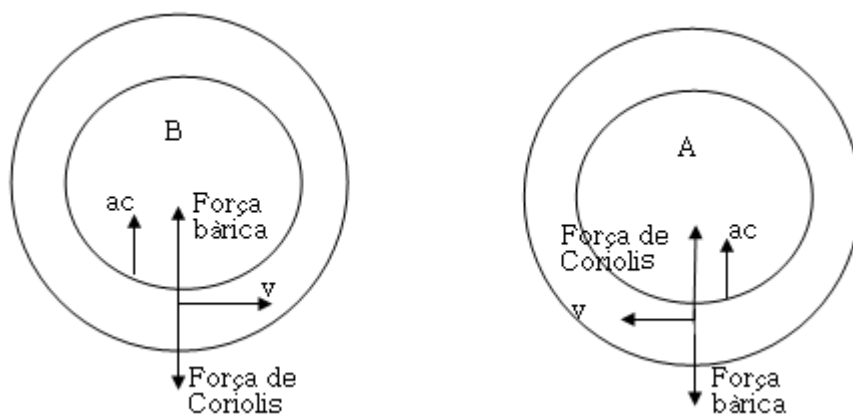
És una força, els efectes de la qual apareixen pel fet que el moviment de les masses d'aire s'observa des de la superfície de la Terra en rotació. Aquesta força es manifesta desviant la direcció de l'aire tal i com s'observa a la figura 2.



**Figura 2- L'efecte de Coriolis**

### ❖ Moviment ciclònic i anticiclònic:

Un altre tipus de moviment és el que es dona quan l'aire segueix una trajectòria curvilínia al voltant d'un nucli d'alta o baixa pressió. En aquest cas la força de Coriolis i la bàrica no són iguals i de sentit oposat donant a lloc a una acceleració centrípeta dirigida cap al centre de la curvatura.



**Figura 3-Moviment al voltant de centres de baixa o alta pressió**

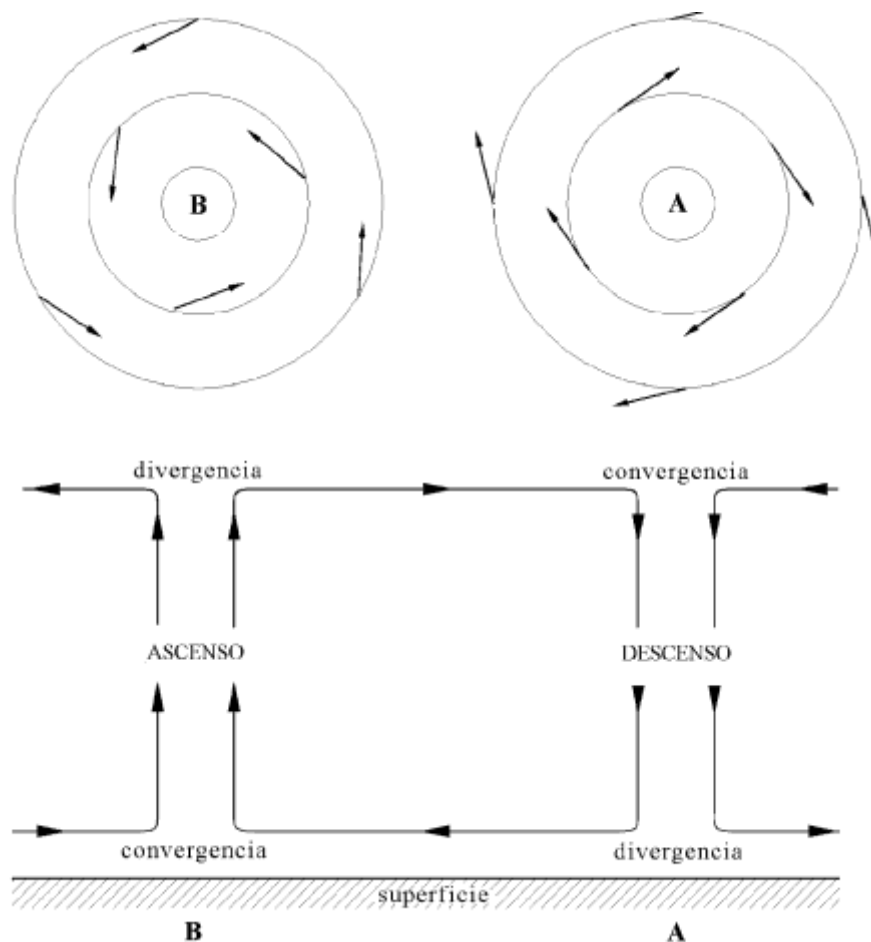
La figura 3B indica que, en un sistema de baixes pressions, el vent segueix una trajectòria més o menys circular ja que la força de Coriolis és més petita que la pressió. La diferència entre les dues forces dona l'acceleració centrípeta neta. En el cas de les altes pressions, figura 3A, l'acceleració centrípeta també és deguda a la diferència entre aquestes forces, però la força de Coriolis és més gran. Quan l'acceleració tangencial és nul·la, aquest

vent que circula paral·lelament al llarg de les isòbares corbes és conegut amb el nom de vent del gradient.

En el cas de baixes pressions, també anomenat depressió, on la força bàrica va dirigida cap endins i la de Coriolis cap enfora, el vector velocitat ha de tenir el sentit que indica la figura 3A, de manera que el moviment al voltant del cercle és el oposat al de les agulles del rellotge. És un moviment ciclònic. En el cas de les altes pressions, la disposició de forces és tal que el moviment té el sentit oposat, i per això, rep el nom d'anticicló.

#### ❖ Forces de fregament:

L'acumulació i la pèrdua d'aire a les proximitats de la superfície ha d'estar compensat pel moviment vertical. A la figura 4 es representen un cicló i un anticicló vistos de perfil. Podem observar que l'aire s'eleva per sobre de la depressió i descendeix sobre l'anticicló, produint en compensació convergència o divergència a la troposfera superior.



**Figura 4-Moviments verticals de l'aire associats als centres de baixa i alta pressió**

El temps meteorològic en els anticiclons: Els centres d'alta pressió són sistemes pels quals es produeix divergència en la superfície, i en conseqüència, al seu interior l'aire descendeix i es comprimeix. Això no deixa formar núvols i, per tant, un anticicló dóna lloc a bon temps.

El temps meteorològic en les depressions: En aquesta àrea es produeix la convergència de l'aire a la superfície, aquesta convergència té una lligadura amb la presència de moviments ascendants. Quan una depressió afecta a una zona és molt corrent la formació de núvols i pluja.

## 2.2 Mapes meteorològics

Els mapes del temps són representacions gràfiques dels valors de certes variables meteorològiques sobre una zona geogràfica determinada. Els tipus de representació són molt diversos.

### 2.2.1 Models deterministes

#### Pressió a nivell del mar

Aquests models representen sobre el terreny el nivell de pressió. Donen informació sobre si hi ha moviments anticiclònics o ciclònics.

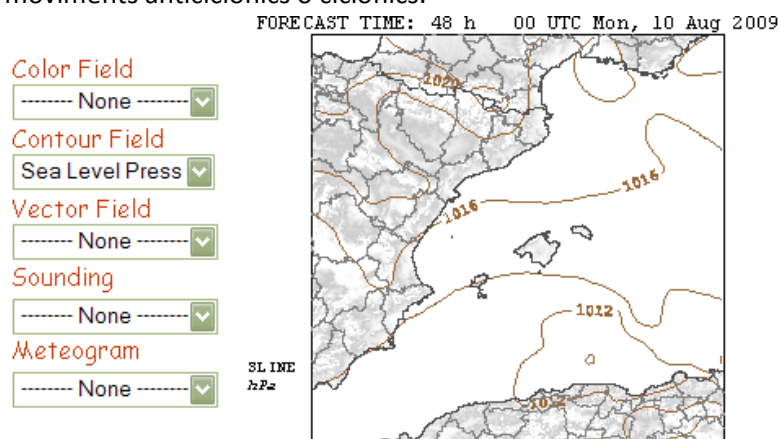


Figura 5- Mapa de pressió

#### Direcció i mòdul del vent

Donen una idea de la direcció i mòdul del vent en una zona determinada. A la part de baix de la imatge 6 es pot observar que hi ha una llegenda on el vector té una magnitud de 50 m/s, de manera que, la longitud del vector ens indica el mòdul, i l'angle la direcció.

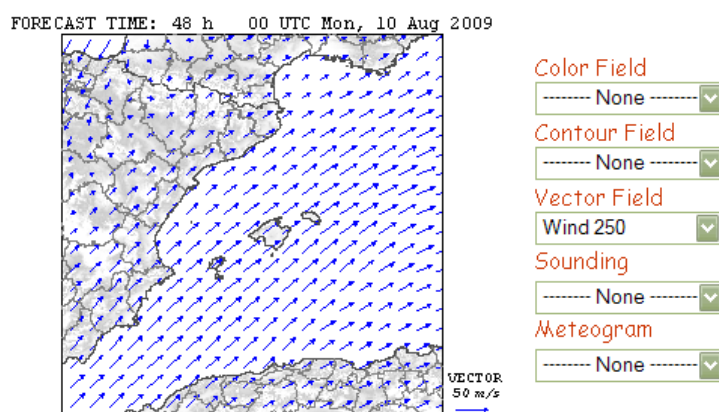


Figura 6-Mapa de direcció i mòdul del vent

## Precipitació

Sobre una zona d'interès ens informa de la quantitat de precipitació que ha caigut. Per exemple, seguint la llegenda, aquest mapa ens indica que a la zona dels Pirineus ha plogut més que a la resta de Catalunya.

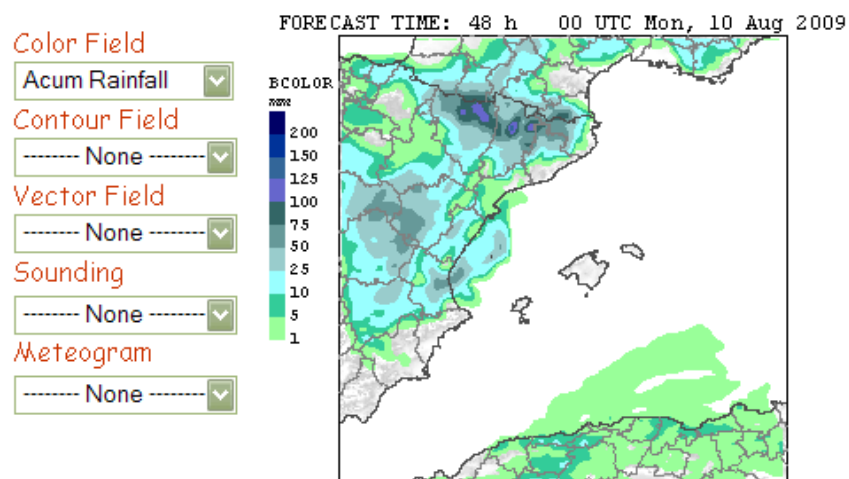


Figura 7-Mapa de precipitació

## Humitat relativa

Serveix per conèixer la humitat relativa. És un mapa molt útil a l'estiu ja que si no hi ha molta humitat a l'ambient hi ha possibilitats que es declari un incendi forestal. Aquests tipus de mapes estan al punt de mira dels bombers i agents forestals.

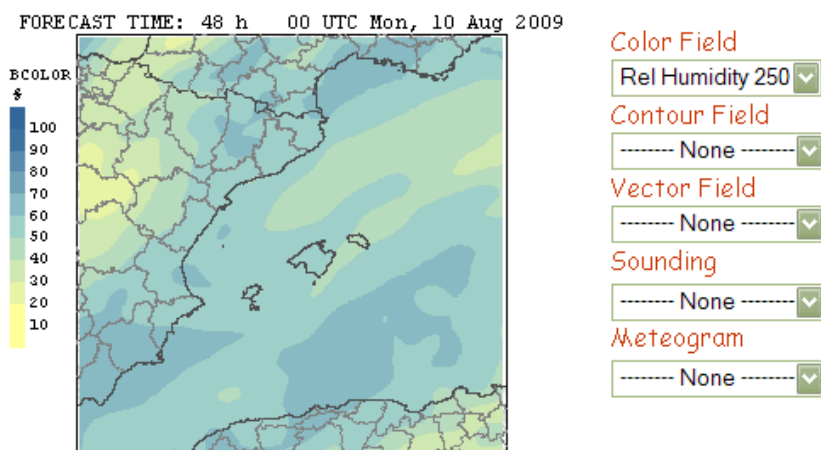


Figura 8-Mapa de humitat relativa

### 2.2.2 Models probabilístics

Mapes utilitzats per fer la previsió del temps. Et donen una probabilitat de que, per exemple, hi hagi un anticicló o cicló.

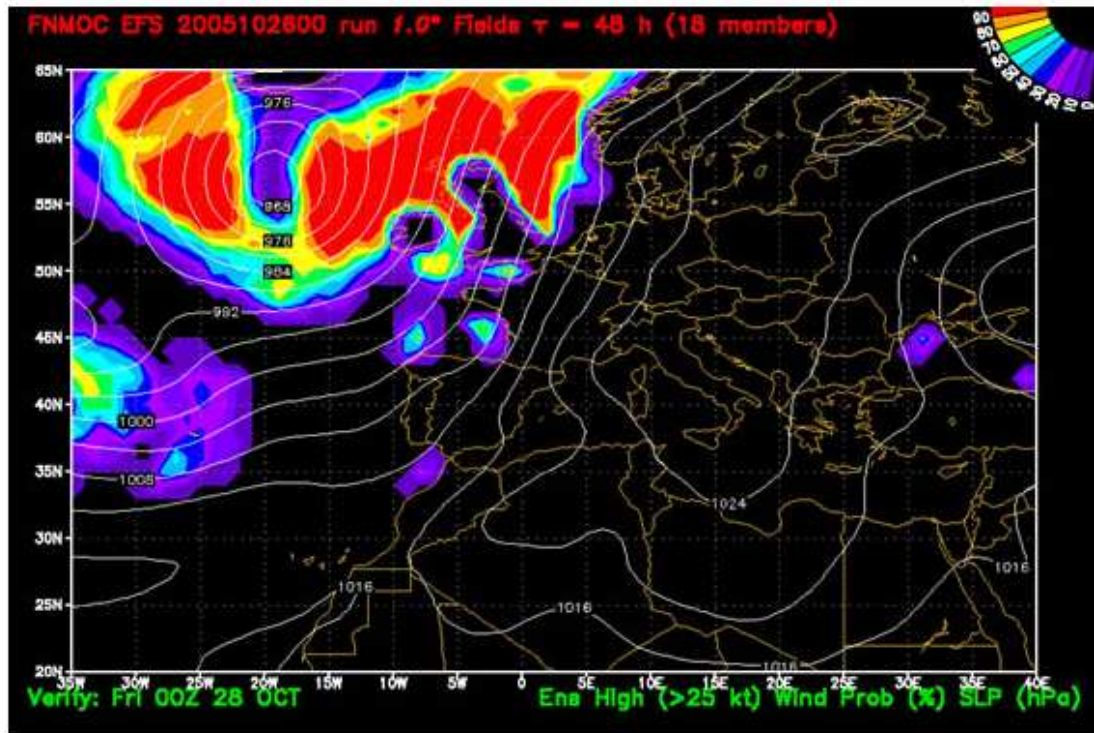


Figura 9-Mapa probabilístic

## Capítol III: Doppler Radar

La paraula *radar* és una abreviació de *Radio Detection and Ranging*. En general, els radars usen ones electromagnètiques modulades i antenes directives per transmetre energia dintre d'un volum específic en un espai en busca d'objectes. Aquests objectes dintre del volum estudiat reflecteixen petites porcions d'aquesta energia, altrament dit eco, que retornen al radar. Els ecos són processats, pel receptor del radar, per extreure informació sobre la distància, velocitat, posició i altres característiques dels objectes.

### 3.1 Classificació de radars

Poden ser classificats dintre de nombroses categories basades en les característiques de les especificacions dels radars, com la banda de freqüència, classe d'antena, i ona utilitzada. Els radars poden ser també classificats pel seu objectiu i/o funcionalitat. Això inclou: temps, adquisició i busca, rastreig, tracking, control d'incendis i alerta. També són classificats pel tipus d'ona que utilitzen, o per la freqüència de treball (Taula 1).

Considerant primer les ones, els radars poden ser d'ona contínua, en anglès Continuous Wave (CW), o poden ser Pulsed Radars (PR). Els CW són els que contínuament emeten energia, i utilitzen per separat antenes transmissores i receptores. Els radars CW que no emprenen modulació poden mesurar amb precisió la velocitat radial del objectes (Doppler shift) i posició angular. La informació de la distància del objectiu no pot ser extreta sense usar modulació.

La primera funcionalitat dels radars CW sense modulació és rastrejar i buscar la velocitat dels objectes. Els PR usen un tren de polsos d'ones, principalment modulades. Respecte a la freqüència de treball, es poden classificar basant-se en els diferents Pulse Repetition Frequency (PRF): baix PRF, mitjà PRF i alt PRF. Els PRF baixos són utilitzats sobretot per rastrejar, on la velocitat del objecte (Doppler shift) no és d'interès. En canvi els radars PRF alts principalment mesuren la velocitat. El CW i el PR poden mesurar tant la distància com la velocitat radial utilitzant diferents modulacions.

Letter designation	Frequency (GHz)	New band designation (GHz)
<i>HF</i>	<i>0.003 - 0.03</i>	<i>A</i>
<i>VHF</i>	<i>0.03 - 0.3</i>	<i>A&lt;0.25; B&gt;0.25</i>
<i>UHF</i>	<i>0.3 - 1.0</i>	<i>B&lt;0.5; C&gt;0.5</i>
<i>L-band</i>	<i>1.0 - 2.0</i>	<i>D</i>
<i>S-band</i>	<i>2.0 - 4.0</i>	<i>E&lt;3.0; F&gt;3.0</i>
<i>C-band</i>	<i>4.0 - 8.0</i>	<i>G&lt;6.0; H&gt;6.0</i>
<i>X-band</i>	<i>8.0 - 12.5</i>	<i>I&lt;10.0; J&gt;10.0</i>
<i>Ku-band</i>	<i>12.5 - 18.0</i>	<i>J</i>
<i>K-band</i>	<i>18.0 - 26.5</i>	<i>J&lt;20.0; K&gt;20.0</i>
<i>Ka-band</i>	<i>26.5 - 40.0</i>	<i>K</i>
<i>MMW</i>	<i>Normally &gt;34.0</i>	<i>L&lt;60.0; M&gt;60.0</i>

Taula 1-Bandes de freqüència

### 3.2 Freqüència Doppler

La freqüència Doppler és utilitzada per extreure la velocitat radial dels objectes i, per tant, podem diferenciar entre els objectes estacionaris o els cinètics. El fenomen Doppler és la desviació de la freqüència central que pateix l'ona incident al radar, degut al moviment del objecte, respecte l'ona enviada. Depenent de la direcció de moviment del objectiu aquesta desviació de freqüència pot ser positiva o negativa. El raig incident al objectiu té un front d'ones de fases iguals separades per la longitud d'ona. Un objecte que es mou cap al radar provocarà una reflexió d'un front d'ones on la longitud d'ona serà més petita. Si aquest objecte s'allunya del radar provocarà una reflexió amb una longitud d'ona més gran que la produïda pel radar, tal i com s'observa a la figura 10.

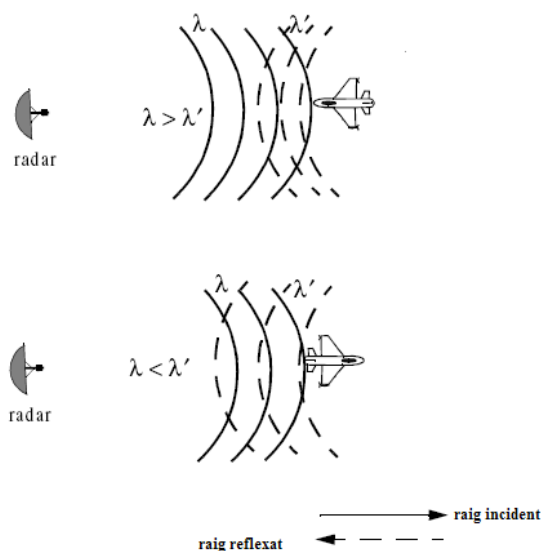
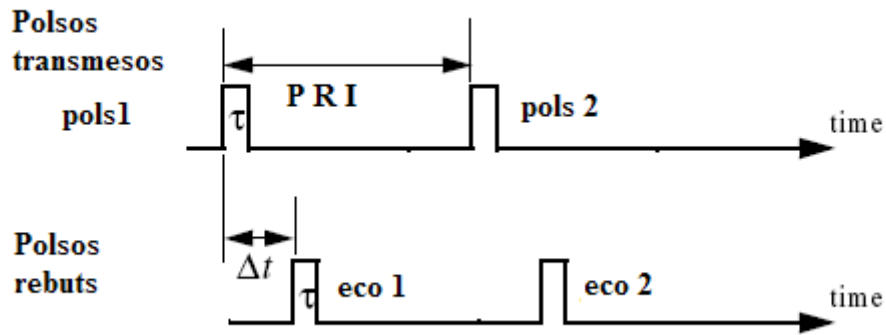


Figura 10-Efecte de les ones reflectides d'un objecte amb moviment

Considerem un pols amb un ample de banda de  $\tau$  segons que incideix sobre un objecte, el qual s'està movent cap al radar a una velocitat  $v$ , tal i com es representa a la figura 11. Definim  $d$ , com la distància (en metres) que l'objecte es mou durant el interval del pols  $\Delta t$ ,

$$d = v\Delta t \quad (3.1)$$



**Figura 11-Polsos del radar**

on  $\Delta t$  és igual al temps entre la pujada i baixada del pols.

Tenint en compte que el pols viatja a la velocitat de la llum i que s'ha desplaçat una distància de  $c\tau - d$  degut a xoc amb l'objecte. Aleshores,

$$\Delta t = \frac{c\tau - d}{c} \quad (3.2)$$

Combinant l'equació 3.1 i 3.2 obtenim,

$$d = \frac{vc}{v + c} + \tau \quad (3.3)$$

Ara, en  $\Delta t$  segons el pols de baixada s'ha desplaçat una distància de  $s$ ,

$$s = c\Delta t \quad (3.4)$$

Llavors el pols reflectit té  $\tau'$  segons d'amplada o  $L$  metres,

$$L = c\tau' = s - d \quad (3.5)$$

Substituint les equacions 3.3 i 3.4 a la 3.5 obtenim,

$$c\tau' = c\Delta t - \frac{vc}{v + c} \tau \quad (3.6)$$



$$c\tau' = \frac{c^2}{v+c}\tau - \frac{vc}{v+c}\tau = \frac{c^2 - vc}{v+c}\tau \quad (3.7)$$

$$\tau' = \frac{c-v}{c+v}\tau \quad (3.8)$$

A la pràctica, el factor  $(c-v)/(c+v)$  és anomenat com a “time dilation”. Si  $v=0$  llavors  $\tau'=\tau$ . De la mateixa manera que hem extret  $\tau'$  per un objecte que s’apropa al radar, també ho podem fer per un objecte que s’allunya, en aquest cas:

$$\tau' = \frac{v+c}{c-v}\tau \quad (3.9)$$

Per aconseguir l’expressió de la freqüència Doppler, considerem la figura 12 on s’observa que cada  $2\Delta t$  hi ha un “leading edge” i recórrer una distància  $(c/fr)-d$ , on  $fr$  és l’invers del PRI (Pulse Repetition Interval). En el mateix interval de temps el pols 1 viatja  $c\Delta t$  o, dit d’una altra manera,

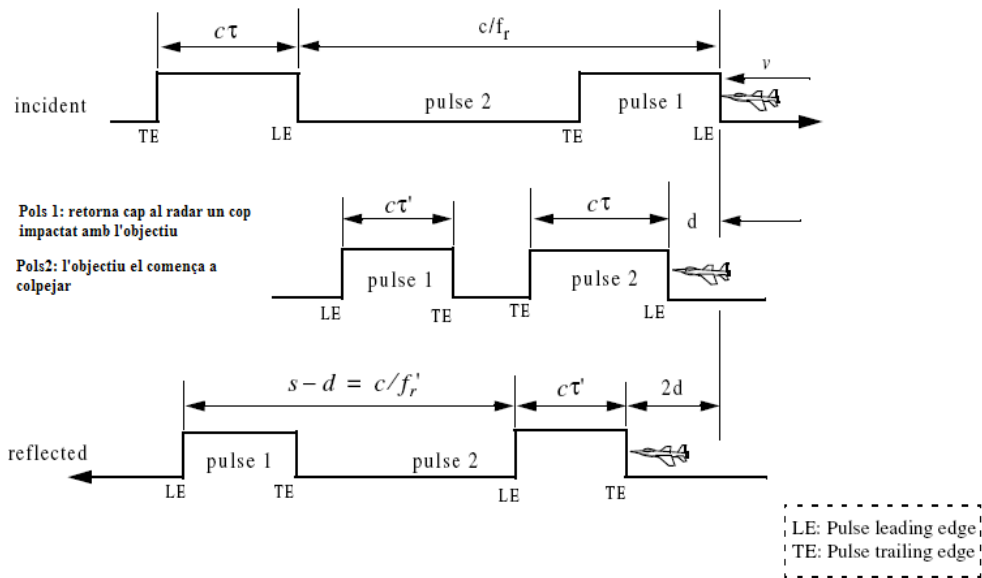
$$d = v\Delta t \quad (3.10)$$

$$\frac{c}{fr} - d = c\Delta t \quad (3.11)$$

Resolent  $\Delta t$ ,

$$\Delta t = \frac{c/fr}{c+v} \quad (3.12)$$

$$d = \frac{cv/fr}{c+v} \quad (3.13)$$



**Figura 12-Efecte als polsos d'un radar degut a un objecte amb moviment**

L'espai entre els polsos reflectits ara és  $s - d$ , de manera que el PRF és diferent (el PRF és l'invers del PRI), és a dir, que tenim un nou valor  $fr'$ , on

$$s - d = \frac{c}{fr'} = c\Delta t - \frac{cv/fr}{c + v} \quad (3.14)$$

Relacionem la nova PRF i la PRF original,

$$fr' = \frac{c + v}{c - v} fr \quad (3.15)$$

Canviem la  $fr'$  per la freqüència portadora  $fo'$ ,

$$fo' = \frac{c + v}{c - v} fo \quad (3.16)$$

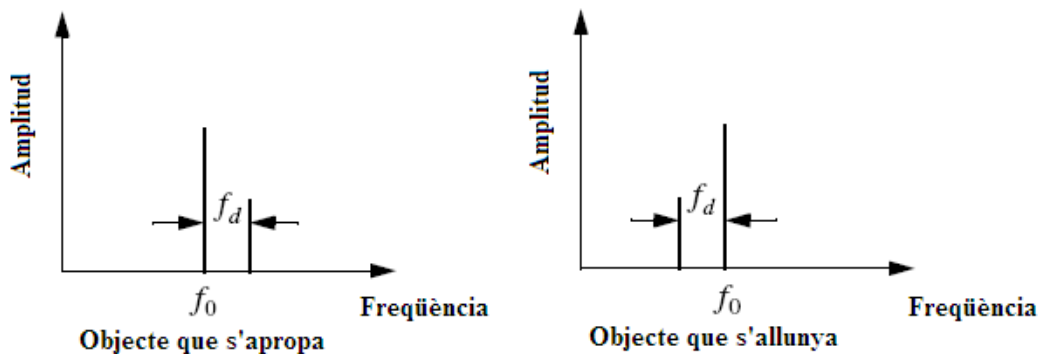
La freqüència Doppler,  $fd$  està definida com la diferència  $fo' - fo$ . Més precisament:

$$fd = fo' - fo = \frac{c + v}{c - v} fo - fo = \frac{2v}{c - v} fo \quad (3.17)$$

Si  $v \ll c$  i  $c = \lambda fo$ , llavors

$$fd \approx \frac{2v}{c} fo = \frac{2v}{\lambda} \quad (3.18)$$

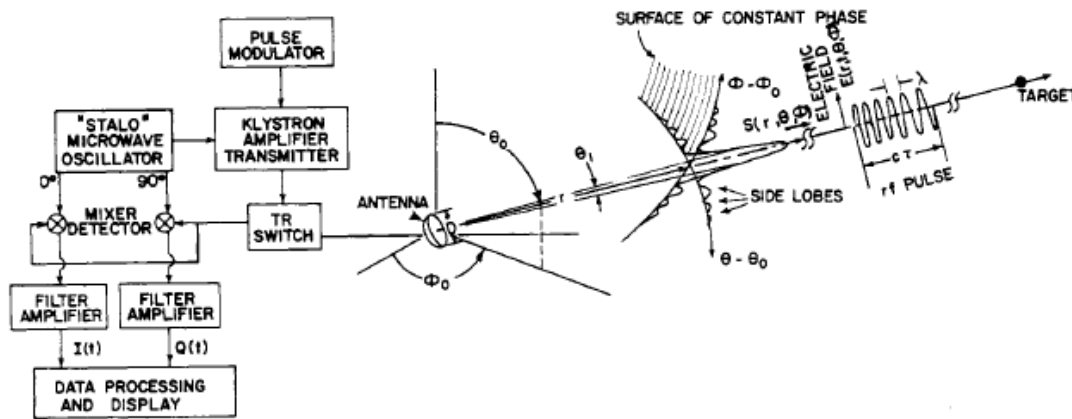
Aquesta última equació ens indica que el desplaçament Doppler (o Doppler shift) és proporcional a la velocitat del objectiu. Per un objecte que s'allunya del radar  $fd = -2v/\lambda$  tal i com es mostra a la figura 13.



**Figura 13-Espectre del senyal que rep el radar**

### 3.3 Estructura del radar

La figura 14 és un diagrama dels principals components d'un radar Doppler. En aquest esquema s'il·lustra el principi bàsic del radar.



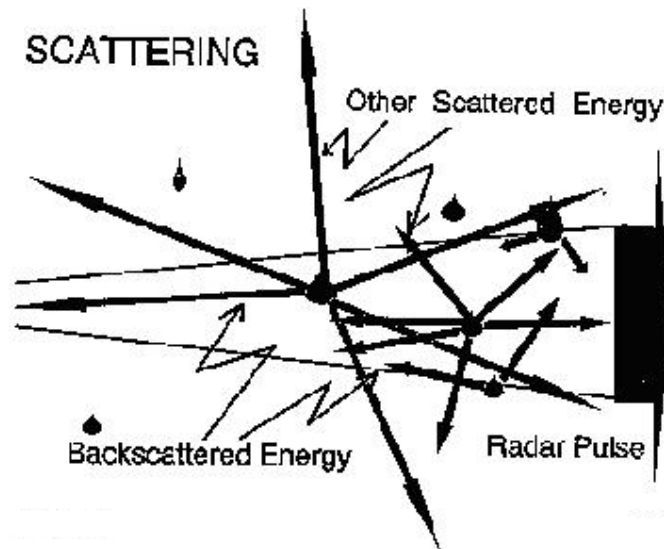
**Figura 14- Diagrama simplificat d'un radar Doppler**

L'oscil·lador local estable (o Stabilized Local Oscillator, STALO) genera una ona contínua (CW) de tipus sinus la qual és modulada (per exemple: OOK) i amplificada pel amplificador Klystron per produir elevada potència. La combinació del oscil·lador i l'amplificador, conegut com a MOPA (Master Oscillator and Power Amplifier) s'empren com a transmissor per la seva alta potència i la puresa del espectre de la senyal.

El desenvolupament dels amplificadors Klystron a l'any 1950 van crear la generació de les microones d'alta potència que són de fase coherent entre pols i pols; una condició necessària pels radars PR si es vol mesurar la velocitat dels objectes. Els polsos del radar són de fase coherent si de pols a pols l'angle de la fase  $\psi_t$  (angle del transmissor) està fixat per cadascun d'ells (per exemple: STALO en el transmissor MOPA).

El Pulse Modulator genera un tren de polsos espaiats un interval de temps  $T_s$ , altrament dit temps de repetició del pols (PRT), cada pols té una duració de  $\tau$  segons.

La potència de la senyal radia els aerosols atmosfèrics (figura 15) dintre de l'àrea del raig, i una petita porció d'aquesta potència és dispersada cap al receptor, situat molts cops, al mateix lloc. A més a més, per raons econòmiques, la mateixa antena és compartida pel transmissor i receptor.



**Figura 15- Potència dispersada pels aerosols**

El commutador transmissor/receptor (T/R switch) connecta el transmissor a l'antena durant  $\tau$  segons, mentre que el receptor és connectat durant el interval  $T_s - \tau$ , "el període d'escolta". Aquest commutador no fa el canvi de manera instantània, per tant hi ha un període de temps (d'unes desenes de microsegons) que no té capacitat de detecció.

L'eco rebut pel radar i el CW del STALO estan ajuntades al Synchronous detectors. Si el bloc STALO no està connectat amb detector, el receptor s'anomena incoherent.

### 3.3.1 Senyal del radar

En el món del radar, la detecció es refereix a grans objectes, però en radars aplicats a la meteorologia, s'anomena el senyal rebut com a *weather signal*, que és el conjunt d'ecos reflectits per aerosols individuals. Després d'un temps, o *delay*, els ecos contínuament són rebuts pel receptor. Perquè aquest no hagi de processar cada eco, es recorre al mostreig del senyal. El radar pot detectar la direcció i força del vent a través dels aerosols que són moguts per l'aire.

### 3.4 El nostre cas: VAD

Els radars Doppler no detecten només la potència reflectida pels aerosols sinó que mesuren la component de la velocitat d'aquests, aquesta velocitat és la que "veuen" els radars amb el seu raig. Els vectors de color lila i blau clar de la figura 16 representen la velocitat radial,  $V_r$ .

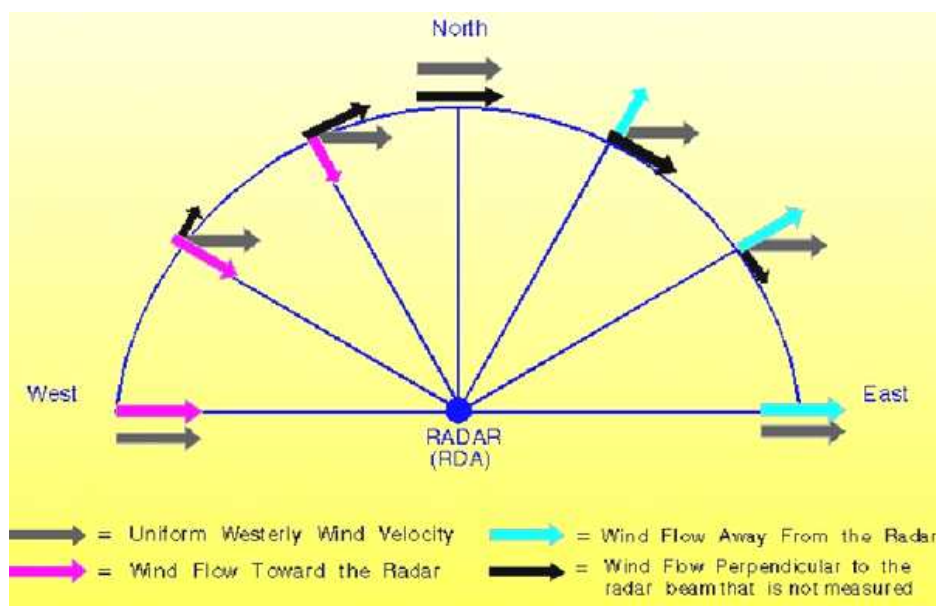


Figura 16- Velocitat radial

### 3.4.1 Funcionament

*Lhermitte i Atlas* (1961) van ser els primers en demostrar la gran importància de la magnitud i direcció de la velocitat del vent horitzontal obtingut a través de la velocitat radial. La tècnica proposada per l'obtenció de les dades és la següent: el raig del radar, que té un angle d'elevació constant, va recorrent de manera circular una superfície. Tal i com es veu a la figura 17 i 18. Aquesta tècnica s'anomena Velocity Azimuth Display, VAD.

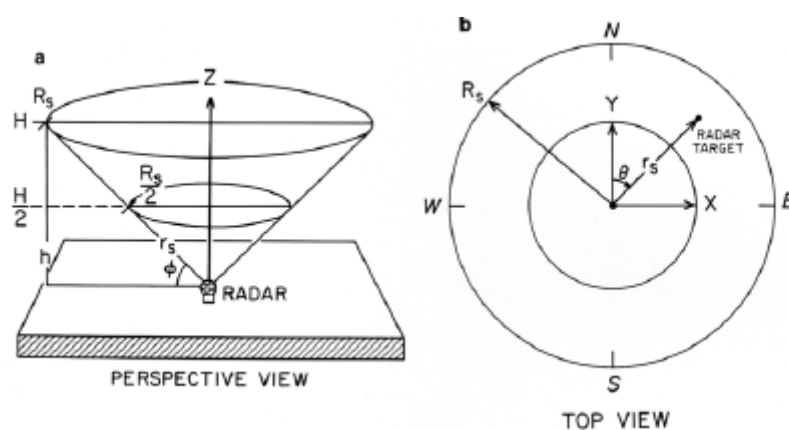
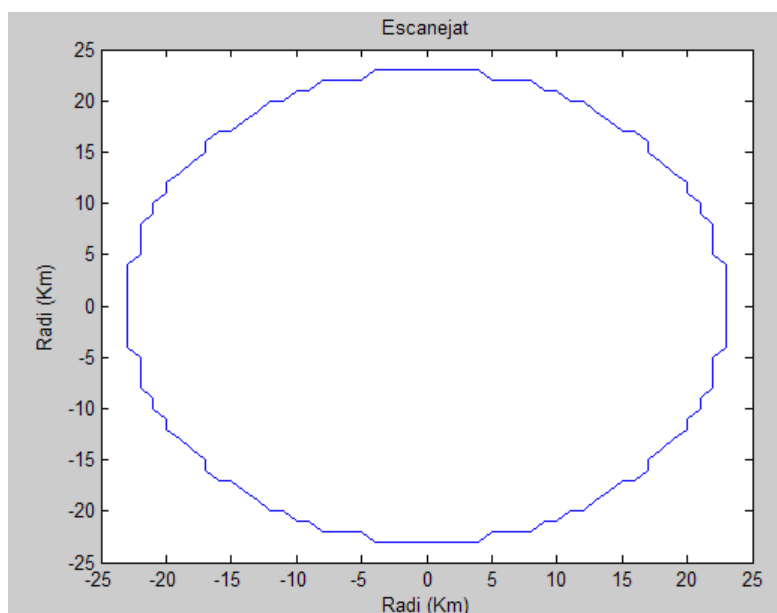


Figura 17- Vista de la configuració del radar Doppler



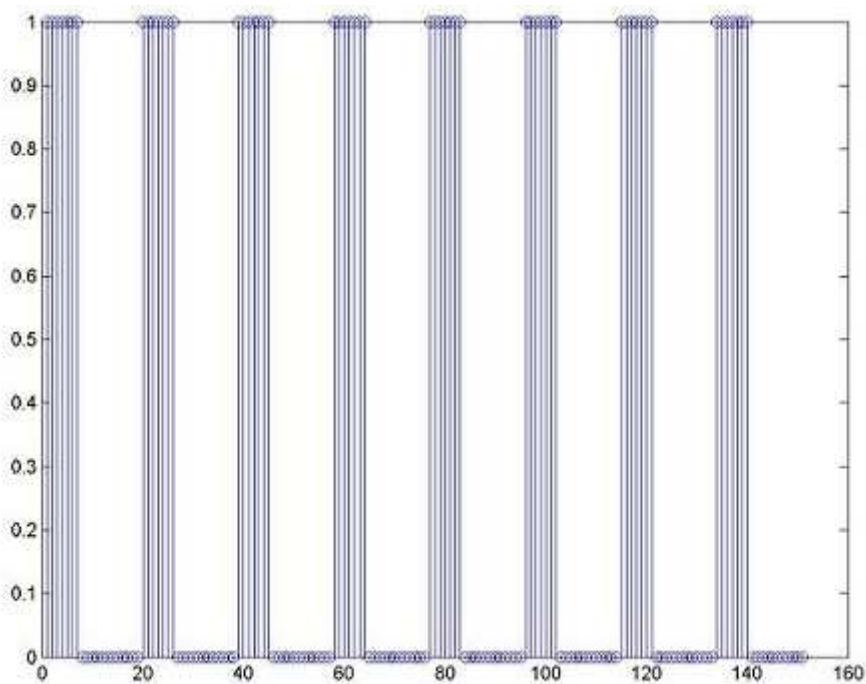
**Figura 18- Radi d'escaneig del radar**

Depenent d'estació de l'any i de l'hora del dia, el radar té un abast de 10-50 km de distància i de 1-3 km d'alçada. Té una precisió de mesura de 0.5m/s.

Un dels radars VAD més conegut i utilitzat en meteorologia és el WSR-88D.

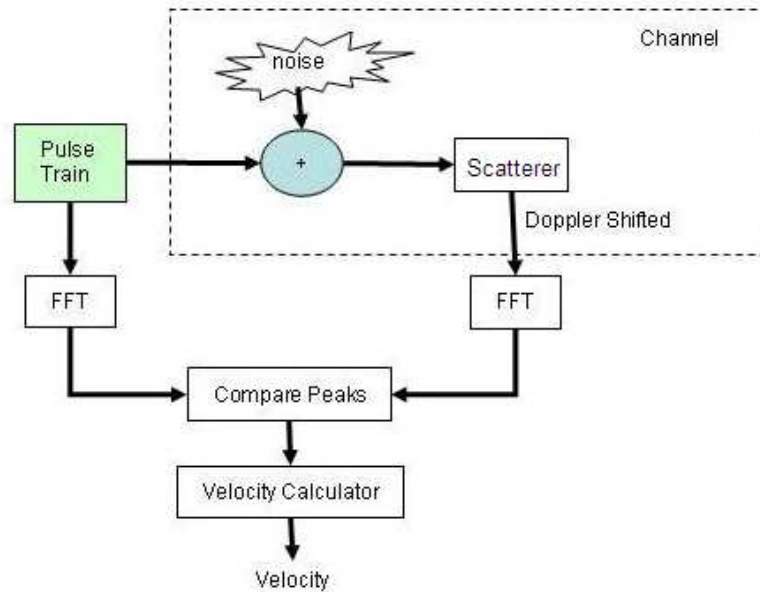
### 3.4.2 Extracció de la velocitat

Com s'ha dit anteriorment, el radar emet un tren de polsos, com el de la figura 19. Aquests viatgen pel canal i xoquen amb els aerosols. La senyal reflectida conté un desplaçament a la freqüència.



**Figura 19- Tren de polsos que envia el radar**

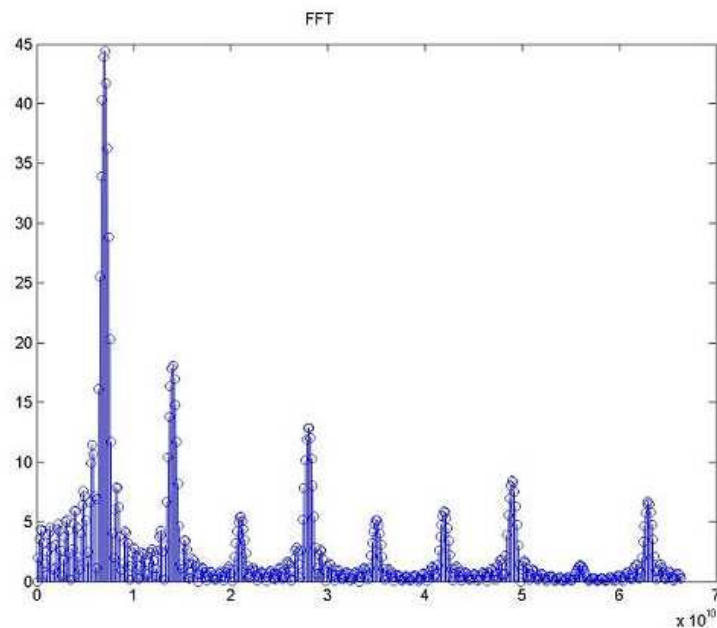
Un cop la senyal rebuda és filtrada i amplificada s'extreu el desplaçament Doppler que ha patit la senyal i en conseqüència la velocitat radial dels aerosols. El bloc està representat a la figura 20.



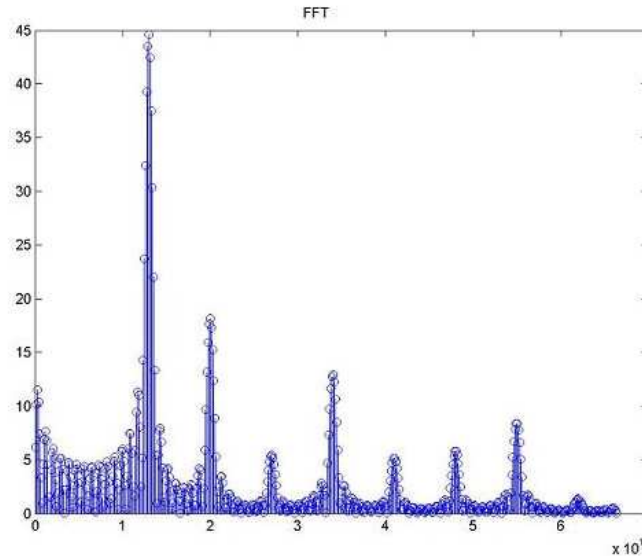
**Figura 20- Diagrama del bloc d'anàlisi de la velocitat**

Per detectar el desplaçament de la freqüència entre la senyal rebuda i l'enviada, s'ha de calcular la TF de les dos senyals per veure l'espectre de les dues. El moviment de la freqüència a l'espectre ens mostrarà la freqüència Doppler.

Com es pot observar a la figura 21 i 22, tenim la TF de la senyal enviada i rebuda respectivament.



**Figura 21- Espectre del senyal enviada pel radar**



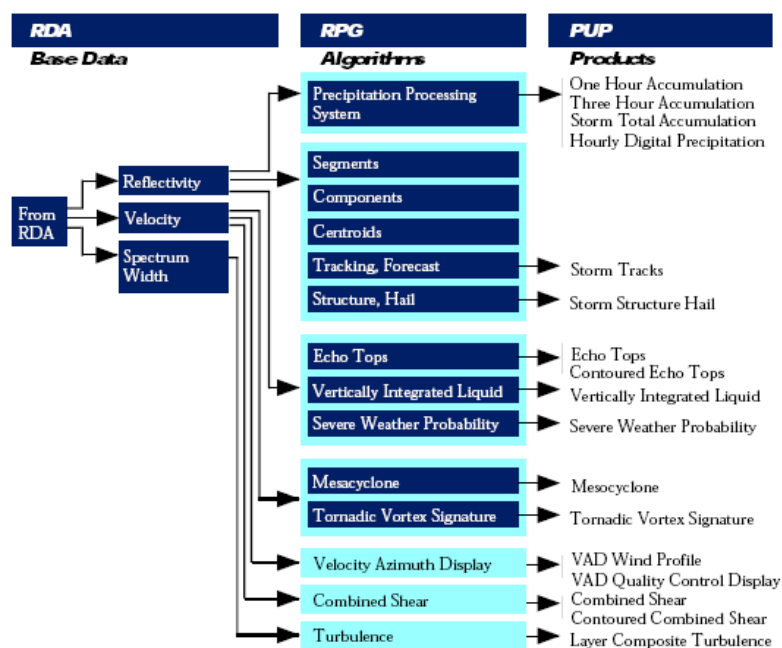
**Figura 22- Espectre del senyal rebuda pel radar**

Un cop obtinguts els dos espectres, em de mesurar el desplaçament entre les dues mirant a quines freqüències es situen els pics de les dues senyals i restant-les. Ara tenim,  $fd$ .

Amb l'equació següent podem calcular la velocitat Doppler a partir de  $fd$ ,  $fc$  (freqüència d'operació del radar) i  $c$  (velocitat de la llum),

$$fd = \frac{2v_d fc}{c} \quad (3.19)$$

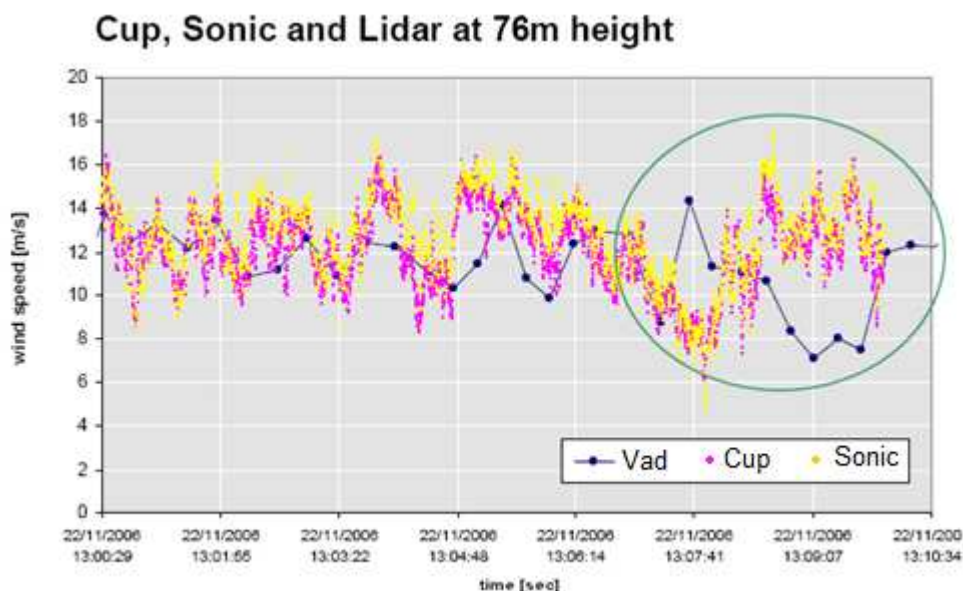
### 3.4.3 Especificacions del WSR-88D



**Figura 23-Diagrama del WSR-88D**



El WSR-88D és el primer radar meteorològic que integra un avançat: disseny, processament de dades a temps real i internet. Consta del amplificador Klystron que li proporciona una gran àrea de rastreig, i una molt bona sensibilitat tant en precipitació com sense. La figura 24 ens mostra la gran robustesa del radar envers els instruments que s'utilitzen actualment, com són els anemòmetres.



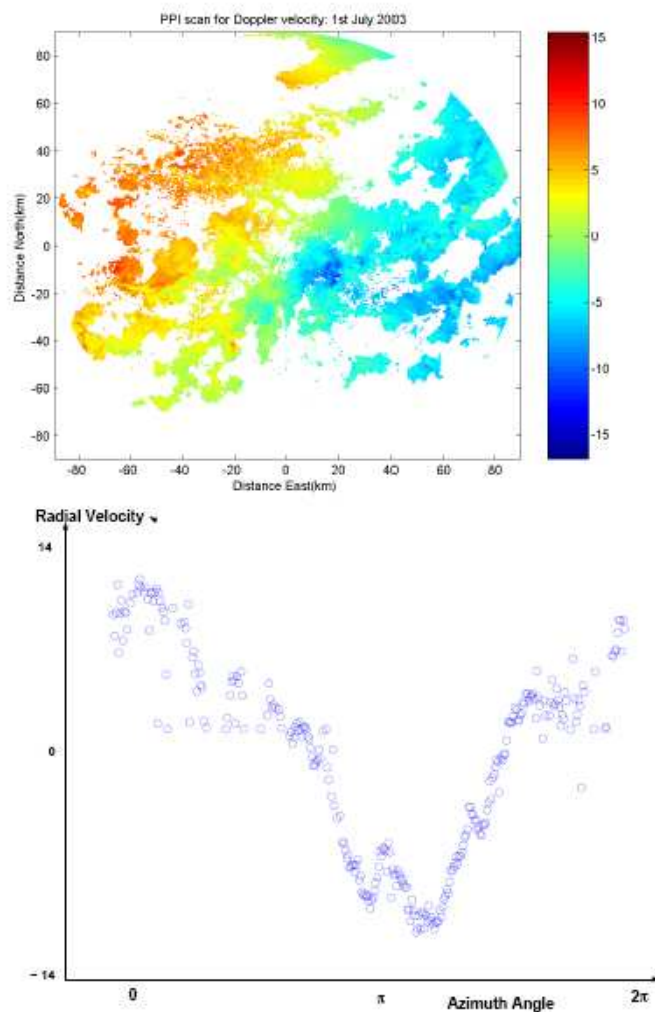
**Figura 24-Distorsió dels anemòmetres**

#### 3.4.4 Observacions Meteorològiques (Dades Reals)

Els moviments atmosfèrics canvien en el temps i l'espai. Com ja s'ha vist, els radars Doppler permeten mesurar un únic component (radial) de la velocitat dels aerosols a una específica distància i angle. A les simulacions posteriors, creades amb Matlab, s'ha considerat el cas més simple on els vents horitzontals i verticals són homogenis. En els casos reals, no es comporta d'aquesta manera com es pot observar a la figura 25.

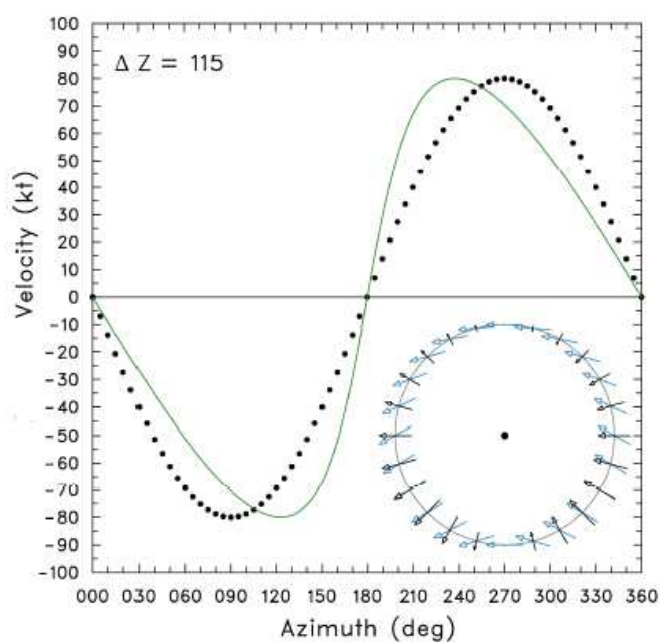
Els mapes representats en aquest apartat són extrets de radars reals VAD. Amb aquestes imatges podem veure com realment el radar processa i representa la velocitat radial.

A la part baixa de figura 25 podem observar com es distorsiona la velocitat rebuda pel radar, s'allunya bastant de un sinus pur, per això, la importància dels mètodes d'estimació espectral. A la part de dalt d'aquesta figura es representa el mòdul.



**Figura 25- A dalt, velocitat radial observada a l'any 2003, a baix, la velocitat radial en funció de l'angle azimuth a una distància de 3 km.**

La desviació del sinus perfecte de la figura 26 ens mostra la combinació dels errors degut a les mesures i als instruments, també de les variacions verticals de la velocitat del vent (no homogeneïtat, figura 26) a una certa alçada causat per les turbulències als límits de les capes atmosfèriques.



**Figura 26-Efecte de les turbulències a la velocitat radial**

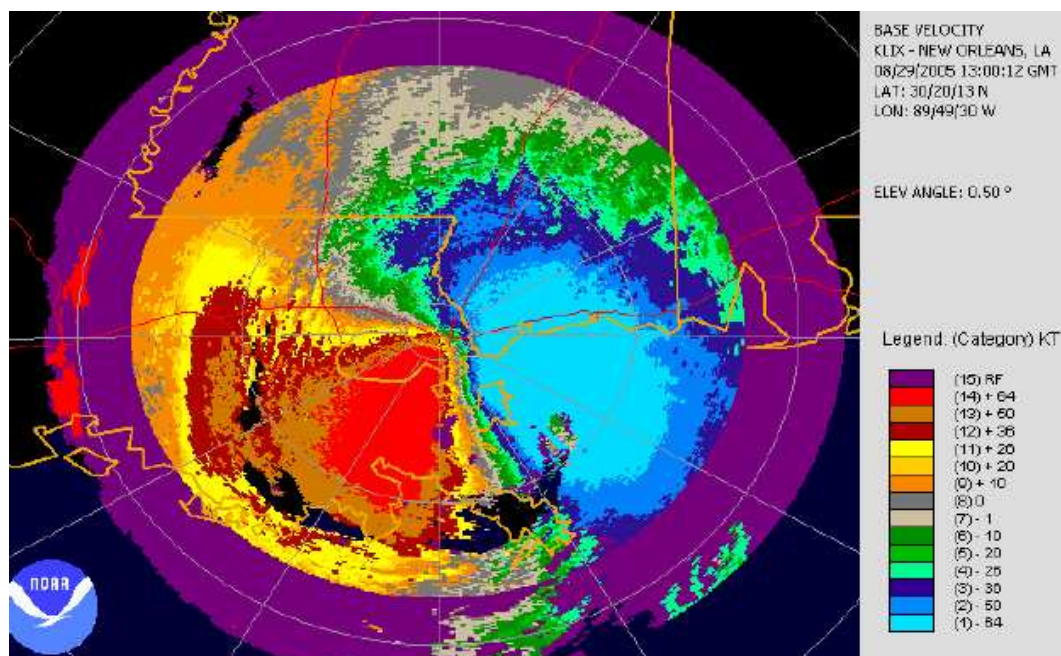
En general, la velocitat de rotació del radar és de 1rpm, suficientment ràpid per disminuir els errors. De fet, en 1 minut és improbable que la tendència del flux de l'aire viatgi més lluny que 1 Km.

La taula 2 ens dona els valors experimentats del radar (part esquerra de la taula) i els extrems del software. La diferència de direcció del vent és de  $\pm 4,3^\circ$  i de velocitat és de  $\pm 3,3$  m/seg

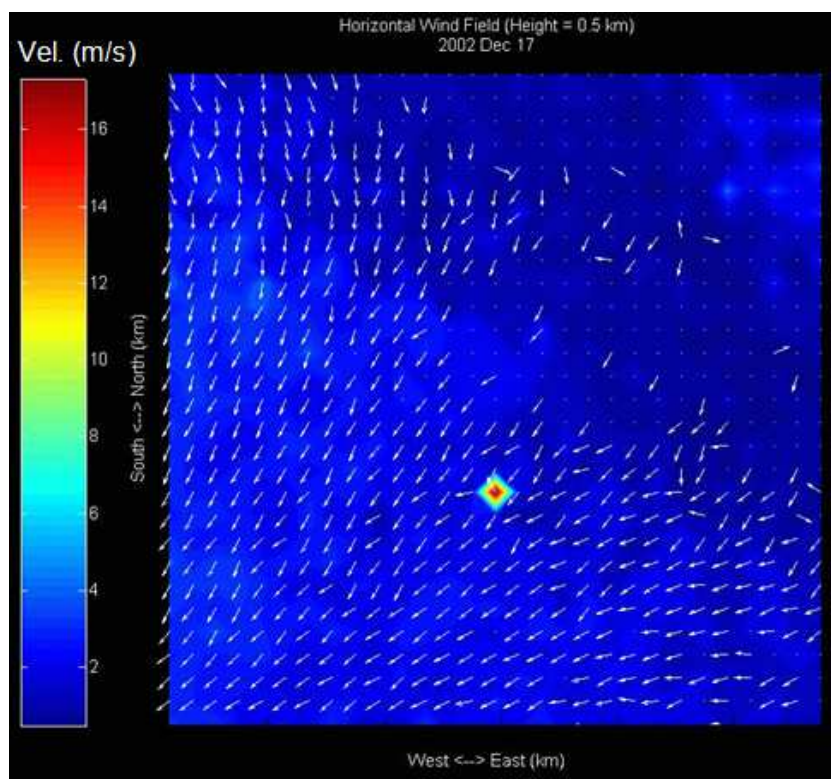
WSR-88D VAD Algorithm				Experimental VAD Algorithm	
ALT (kft)	DIR (deg)	SPD (kt)	ELEV (deg)	DIR (deg)	SPD (kt)
09	081	103	6.0	076	106
14	078	094	9.9	073	091
35	077	063	19.5	054*	055
40	078	044	19.5	057*	049
45	067	048	19.5	070	042

**Taula 2-Comparació de la velocitat i direcció del vent extret pel radar WSR-88D i l'algoritme del radar VAD**

Els següents mapes s'han obtingut a través del radar VAD on el raig està orientat primerament amb una elevació de  $0.5^\circ$ , per exemple, i després va incrementant. Les figures 28 i 29 mostren un vent sense perturbacions, tot el contrari al de la figura 27, que representa un huracà.

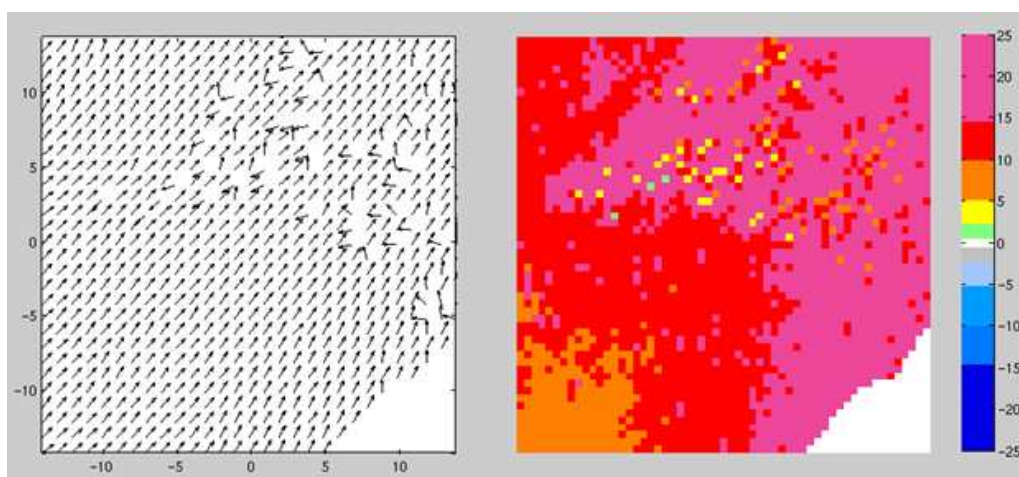


**Figura 27-** Mapa de vent obtingut pel radar WSR-88D, a l'any 2005 durant un huracà, amb un angle d'elevació de  $0.5$  graus



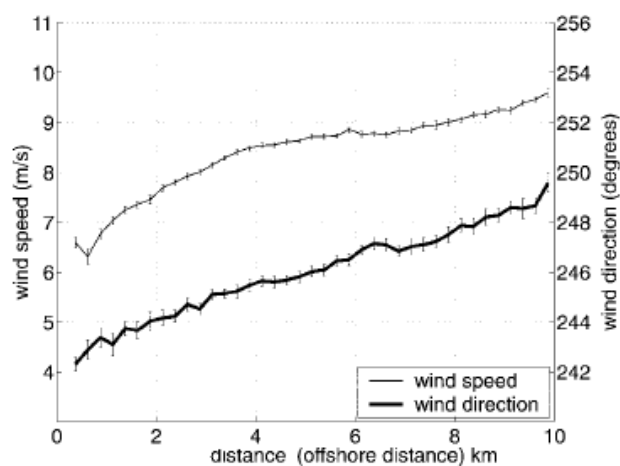
**Figura 28-** Mapa de la direcció i velocitat radial extret radar VAD a l'any 2002 a una alçada de  $0.5$  Km per sobre del nivell del mar



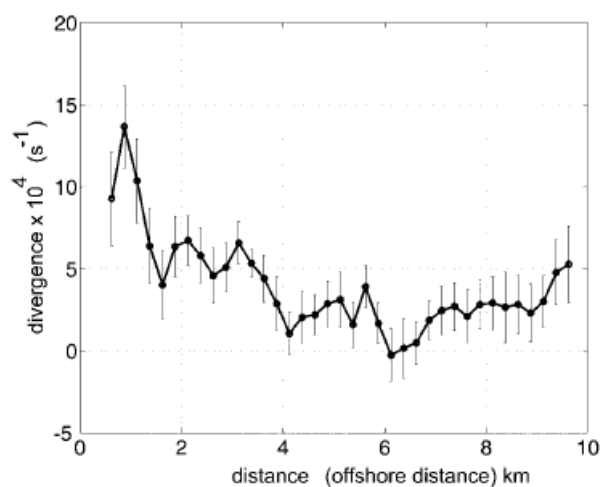


**Figura 29- Mapa de la direcció (esquerra) i velocitat radial (dreta) extretes del radar VAD l'any 2002**

Les dues gràfiques 30 i 31, recullen les dades extretes del radar VAD. Donen una certa idea de la velocitat, direcció i divergència a diferents kilòmetres de la costa. Com més entrem cap al mar, més velocitat té el vent.



**Figura 30- Velocitat i direcció del vent en funció de la distància**



**Figura 31- Divergència en funció de la distància.**

## Capítol IV: Determinació de les propietats cinètiques a partir del Radar Doppler

Molts radars s'usen per observar les precipitacions en una atmosfera "lliure". El radar Doppler detecta un gran rang de velocitats per cada pols enviat. Com bé es sap, la forma de l'espectre Doppler està influenciat per nombrosos factors, com ara el vent, les turbulències, i el intrínsec espectre de la velocitat de descens de la pluja. Tot i això, no ens centrarem amb la forma del espectre Doppler ni amb la velocitat Doppler segons on apunti el raig del radar.

L'ús del radar per mesurar els vents horitzontals va ser suggerit per *Probert-Jones*. *Lhermitte i Atlas* descriuen en detall com un radar determina la velocitat de caiguda de les precipitacions a diferents altituds i la direcció del vent. Van proposar un model d'escaneig el qual el raig del radar està dirigit amb una elevació constant i rota sobre un eix vertical. Com que va girant, la sortida que proveeix és la velocitat radial de la precipitació dels aerosols envers l'angle azimut; altrament dit Velocity Azimuth Display o VAD. *Lhermitte i Atlas* demostren que, amb la condició que els camps de vent i la velocitat de descens de precipitació siguin horitzontalment homogenis, la velocitat radial mitjana és una funció sinus del angle azimut. L'amplitud i el desplaçament total de la funció sinusoidal respecte l'origen de l'eix  $x$  són la velocitat i direcció del vent respectivament.

*Caton* estén la idea de *Lhermitte i Atlas* amb els vents convergents, que produeixen una velocitat radial cap al radar, i afecta al VAD de manera similar a la velocitat de precipitació mitjana.

El mètode de *Browning i Wexler* amplia encara més el concepte anterior obtenint, amb un radar, la deformació i la orientació de la dilatació.

### 4.1 Relació entre les propietats del vent amb el VAD

Considerem un sistema de coordenades cartesianes, amb l'eix  $x$  positiu cap a l'est, l'eix  $y$  positiu cap al nord, i l'eix  $z$  positiu cap amunt. Es contempla que el radar està situat a l'origen del sistema de coordenades. El raig està apuntant a una distància horitzontal  $d$  amb un angle  $\theta_e$ , i rota sobre l'eix vertical per escanejar cercles horitzontals centrades a l'origen.

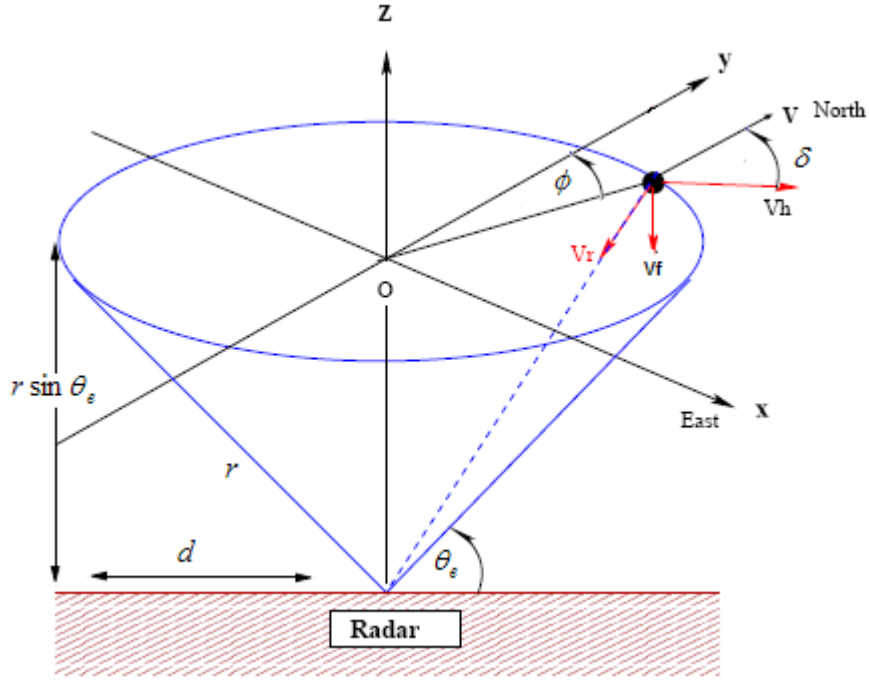


Figura 32-Estructura del radar VAD

S'assumeix que el radar rep un, i només un, retorn per tota una volta, i obté la velocitat de precipitació (d'aerosols o de pluja)  $V_f$  viatjant a través del vent horitzontal  $V_h$  a la direcció  $\delta$ . La velocitat radial mesurada té una dependència amb  $\phi$ ,

$$V_r(\phi) = V_h \cos(\delta - \phi) + V_f \sin(\theta_e) \quad (4.1)$$

Desenvolupem l'equació anterior,

$$V_r(\phi) = V_x(\phi) \cos(\phi) \cos(\theta_e) + V_y \sin(\phi) \cos(\theta_e) + V_f \sin(\theta_e) \quad (4.2)$$

on  $V_r$  convencionalment és la component que s'allunya del radar.

Descomponent els termes  $V_x$  i  $V_y$  com,

$$V_x = V_{x0} + \frac{\partial V_x}{\partial x} x + \frac{\partial V_x}{\partial y} y, \quad (4.3)$$

$$V_y = V_{y0} + \frac{\partial V_y}{\partial x} x + \frac{\partial V_y}{\partial y} y \quad (4.4)$$

Assumint que la velocitat de precipitació és homogènia obtenim,

$$V_r = V_f \sin(\theta_e) + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \overline{V_x}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{V_y}}{\partial y} \right) r \cos^2(\theta_e) + V_{y0} \cos(\theta_e) \sin(\phi) \quad (4.5)$$

$$+ V_{x0} \cos(\theta_e) \cos(\phi) + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \overline{V_x}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{V_y}}{\partial y} \right) r \cos^2(\theta_e) \sin(2\phi) + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \overline{V_y}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{V_x}}{\partial y} \right) r \cos^2(\theta_e) \cos(2\phi)$$

Examinant l'equació anterior, la podem descompondre en la sèrie de Fourier,

$$V_r = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\phi) + b_n \sin(n\phi)) \quad (4.6)$$

amb el coeficient  $a_0$  podem extreure la divergència i amb els coeficients  $a_1$  i  $b_1$  la velocitat i direcció del vent. El coeficient zero de la TF és el promig dels valors del vector  $V_r$ , tant mateix els coeficients  $a_1$  i  $b_1$  formen el primer harmònic, de freqüència :  $1/N$  on  $N$  és el número de mostres del vector  $V_r$ . Per tant el primer harmònic estarà a la freqüència  $1/360$ .

De manera que, es necessita aquests tres coeficients. La manera de calcular aquests coeficients pot ser: amb la TF o amb les següents formules,

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T}^T x_p(t) dt \quad (4.7)$$

$$a_1 = \frac{1}{T} \int_{-T}^T x_p(t) \cos(w_0 t) dt \quad (4.8)$$

$$b_1 = \frac{1}{T} \int_{-T}^T x_p(t) \sin(w_0 t) dt \quad (4.9)$$

on  $x_p(t)$  és el vector  $V_r$  i  $w_0$  és  $\frac{2\pi}{N}$ . Encara que, es pot aplicar la integral a  $V_r$ , en aquest projecte s'utilitzarà la TF per calcular els coeficients.

### 1. Velocitat de vent horitzontal

Equació,

$$V_h = 2|C_1|/\cos(\theta_e) \quad (4.10)$$

Com es pot veure a l'equació 4.10, la velocitat del vent ve donada per la divisió entre el mòdul del primer coeficient de la sèrie de Fourier i el cosinus de l'angle d'elevació. Examinem més l'equació 4.10.

Considerem una funció periòdica  $f(t)$  de període  $T$  pot ser expressades de la següent manera:



$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(nw_0 t) + b_n \sin(nw_0 t)] \quad (4.11)$$

on  $w_0$  és  $\frac{2\pi}{N}$  o  $\frac{2\pi}{T}$ . És possible escriure d'una manera diferent l'equació 4.11, utilitzant les formules de Euler,

$$\cos(nw_0 t) = \frac{1}{2}(e^{jnw_0 t} + e^{-jnw_0 t}) \quad (4.12)$$

$$\sin(nw_0 t) = \frac{1}{2j}(e^{jnw_0 t} - e^{-jnw_0 t}) \quad (4.13)$$

on  $j = \sqrt{-1}$

Substituint,

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_n \frac{1}{2}(e^{jnw_0 t} + e^{-jnw_0 t}) + b_n \frac{1}{2j}(e^{jnw_0 t} - e^{-jnw_0 t}) \right] \quad (4.14)$$

Si  $1/j = -j$ ,

$$\frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{1}{2}(a_n - jb_n)e^{jnw_0 t} + \frac{1}{2}(a_n + jb_n)e^{-jnw_0 t} \right] \quad (4.15)$$

Definim:

$$c_0 = \frac{1}{2}a_0 \quad c_n = \frac{1}{2}(a_n - jb_n) \quad i \quad c_{-n} = \frac{1}{2}(a_n + jb_n) \quad (4.16)$$

Es sap que la funció sinus és imparell, per tant  $b_{-n} = -b_n$ . La fórmula es pot escriure com:

$$f(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (c_n e^{jnw_0 t} + c_{-n} e^{-jnw_0 t}) \quad (4.17)$$

O bé,

$$f(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n e^{jnw_0 t} + \sum_{n=-1}^{-\infty} c_n e^{jnw_0 t} \quad (4.18)$$

És a dir,

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{jnw_0 t} \quad (4.19)$$

A l'equació anterior se l'anomena forma complexa de la sèrie de Fourier, i els seus coeficients es poden obtenir de la següent manera,

$$c_n = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) e^{-jnw_0 t} dt \quad (4.20)$$

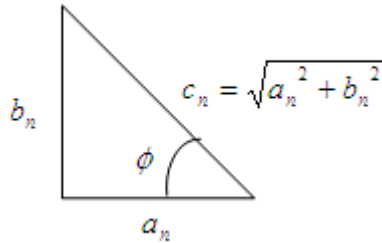
per  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

Els coeficients  $c_n$  són números complexos, i també es poden escriure en forma polar:

$$c_n = |c_n| e^{j\phi_n} \quad (4.21)$$

on  $|c_n| = \frac{1}{2} \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$  i  $\phi = \arctan\left(\frac{-b_n}{a_n}\right)$ . Per  $n = 0$ ,  $c_0$  és un número real  $c_0 = \frac{1}{2} a_0$ .

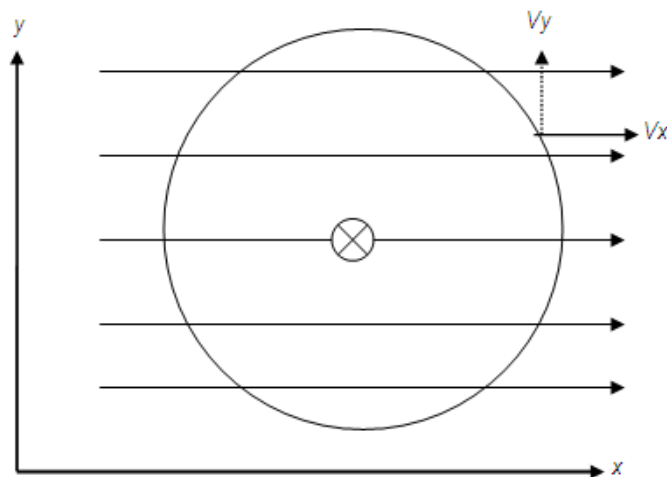
També podem expressar els coeficients pensant amb un triangle rectangle:



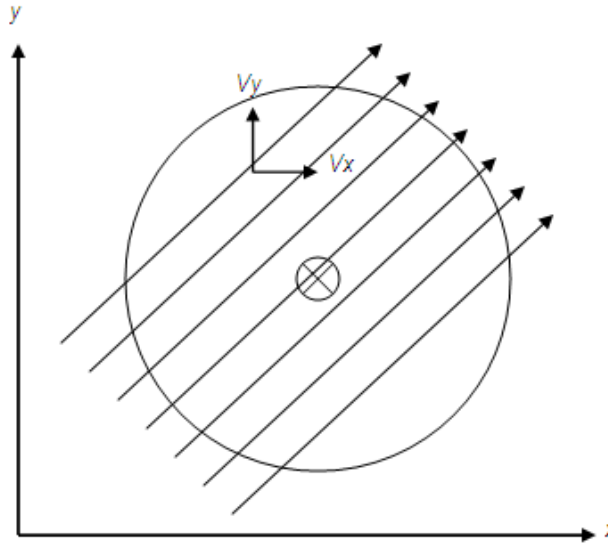
**Figura 33-Representació de la sèrie de Fourier**

Es planteja el següent escenari:

#### Cas 1



**Figura 34- Cas 1 Vent horitzontal**

Cas 2**Figura 35- Cas 2 Vent horitzontal**

La circumferència de la figura 34 i 35 representa el raig del radar (situat a on esta la creu) escanejant una zona. L'eix  $x$  i  $y$  formen una superfície.

El camp de vent està format per dos components,  $V_x$  i  $V_y$ . El pes de cada component dóna una direcció al camp.

El radar rastreja tota la circumferència per mesurar la velocitat radial del vent, el seu valor en dependrà de l'angle de rotació del radar. Per exemple, la velocitat radial en el Cas 1 valdrà zero quan l'angle de rotació del radar sigui de  $90^\circ$  o de  $270^\circ$  degut a que el raig del radar i el camp de vent són perpendiculars i per tant la velocitat no pot ser mesurada. En el Cas 2 la velocitat radial serà nul·la quan el raig del radar sigui perpendicular al camp.

La velocitat radial  $V_r$  s'obté amb el primer coeficient de la sèrie de Fourier,  $C_1$ . S'agafa només el primer perquè la velocitat radial és una sinusoide; si s'agafés més coeficients es tindria un sumatori de sinus i cosinus.

**2. Divergència horitzontal**

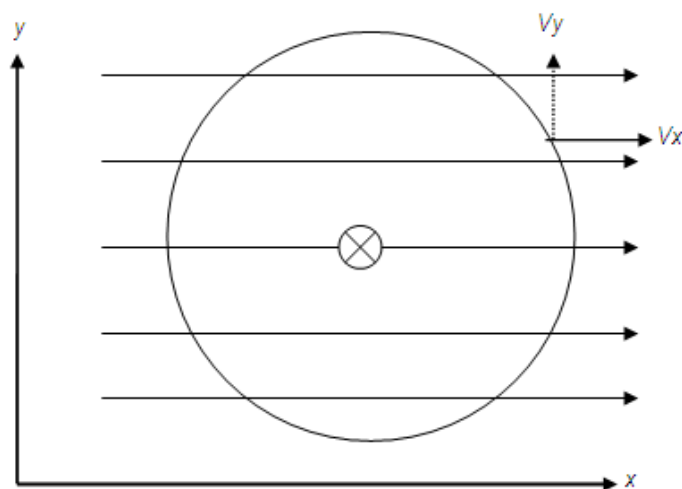
Equació,

$$Div \equiv \left( \frac{\partial \overline{V_x}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{V_y}}{\partial y} \right) = \frac{2}{r \cos^2(\theta_e)} (a_0 - V_f \sin(\theta_e)) \quad (4.22)$$

En el cas que s'utilitzi angles d'elevació,  $\theta_e$ , petits:

$$Div = \frac{1}{\pi d \cos \theta_e} \int_0^{2\pi} V_r d\theta - \frac{2 \tan \theta V_f}{d} \quad (4.23)$$

Per entendre l'equació de divergència posem l'estructura de vent més simple: vent amb component horitzontal, tal i com es veu a la figura 36. La circumferència representa el raig del radar (situat a on està la creu) escanejant una zona. L'eix  $x$  i  $y$  formen una superfície.



**Figura 36- Vent amb divergència zero**

En aquest escenari, el vent es pot descompondre en dos vectors  $V_x$  i  $V_y$ . La contribució d'aquests dos vectors donarà una estructura determinada al vent.

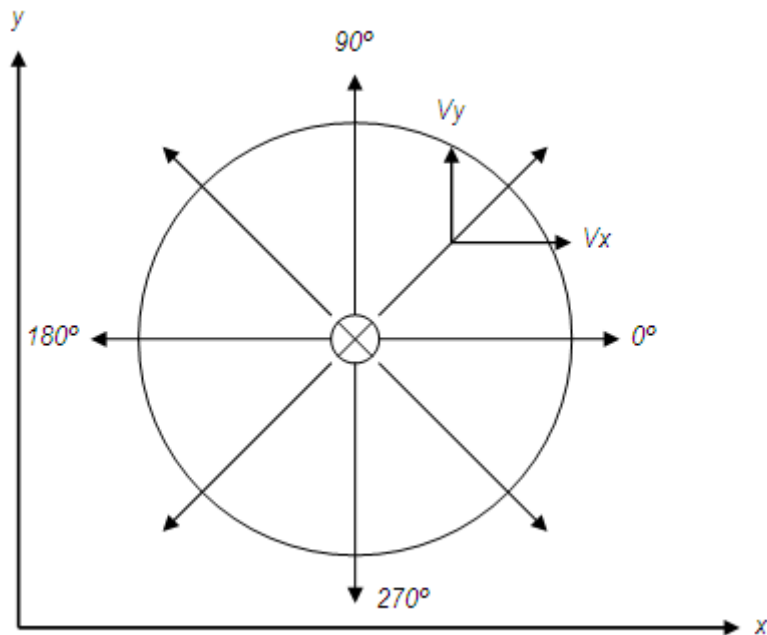
En el cas de tenir només contribució per part de la component  $V_x$ , el vent serà horitzontal. Segons l'equació 4.8 la divergència ve donada per la derivada parcial de  $V_x$  respecte l'eix  $x$  i de  $V_y$  respecte l'eix  $y$ . Vegem què vol dir la derivada parcial.

Matemàticament una derivada parcial ens diu com ha variat la funció respecte una variable. La derivada parcial es pot entendre com una suma de les diferències entre els valors d'una funció. Si posem els valors  $V_x$  mesurats, per a cada angle de rotació, a un vector i es fa la diferència entre els valors adjunts veurem que dona zero perquè tots els valors són iguals.

Que els valors de  $V_x$  siguin iguals ens està indicant un vent de component únicament horitzontal.

De manera que cada punt, on el radar està mesurant la velocitat, la component  $V_x$  tindrà el mateix valor, per això, la derivada parcial de  $V_x$  respecte  $x$  ( $\frac{\partial V_x}{\partial x}$ ) serà zero. I el mateix passa amb la component  $V_y$ .

A la pràctica, els vents tenen component  $V_x$  i  $V_y$ , on cada component té valor (són diferents de zero). L'escenari és el de la figura 37.



**Figura 37- Vent divergent**

Per cada posició de rastreig, les components  $V_x$  i  $V_y$  tenen una influència més gran o més petita.

Per exemple, quan el radar es troba a  $90^\circ$  només hi ha contribució de la component  $V_y$ , en canvi a  $180^\circ$  únicament té valor la component  $V_x$ . Si posem, com s'ha fet abans, els valors de  $V_x$  en un vector de 360 posicions (una velocitat per cada posició) i els valors de  $V_y$  a un altre vector i es calcula la diferència entre els valors adjunts d'un vector i a continuació el de l'altre vector veurem que no dona zero perquè per a cada posició les components tenen un pes diferent.

La velocitat radial,  $V_r$ , d'aquest escenari és constant tal i com s'il·lustra a la figura 38 perquè la divergència del camp no depèn de l'angle de rastreig, doncs matemàticament les derivades parcials donen un escalar a partir d'un vector. Aquesta constant es pot interpretar, a nivell de senyal, com un offset que pateix la  $V_r$ .

Per poder extreure el valor de la divergència del camp ens hem de fixar en el coeficient  $C_0$  de la sèrie de Fourier. A l'equació 4.6 el coeficient  $a_0$  no està multiplicat per cap sinus o cosinus, i per analogia aquest component ens aporta el valor de la divergència d'un camp vectorial.

A la realitat, no hi ha vents purament divergents ni horitzontals sinó que es produeixen combinacions dels dos.

### 3. Direcció de vent horitzontal

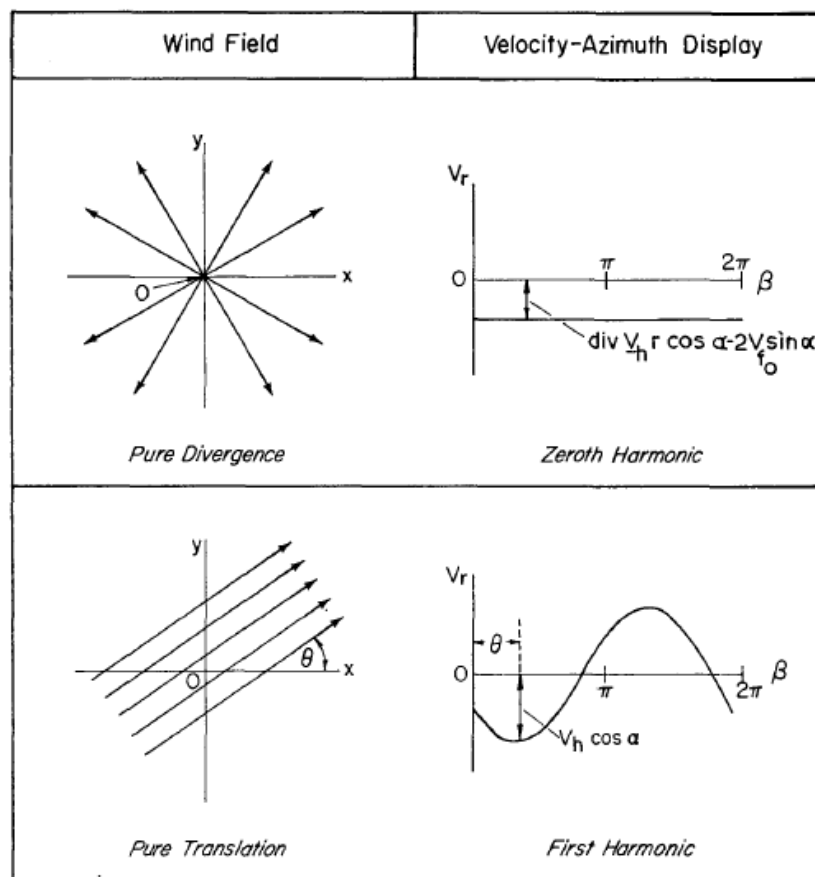
L'equació 4.24 ens dóna la direcció del vent,

$$D = \arg C_1 - \pi \quad (4.24)$$

A l'apartat anterior s'ha comentat en quin angle la velocitat radial serà nul·la. De fet, mirant la forma sinusoidal de  $V_r$  es pot determinar la direcció del vent. En el cas que el vent tingues un angle de  $0^\circ$  respecte l'eix  $x$ , els valors nuls de la funció sinusoidal estarien situats als angles  $90^\circ$  i  $270^\circ$ , si el camp de vent tingues un angle respecte l'eix  $x$  de  $1^\circ$ , els valors no estarien a  $90^\circ$  i  $270^\circ$  sinó a  $91^\circ$  i a  $271^\circ$  respectivament.

Els vents horitzontals contribueixen només als primers tres coeficients de la sèrie de Fourier, en un període de  $0 \leq \phi \leq 2\pi$ .

La relació entre el tipus de vent i els resultats de les mesures del radar VAD es mostra a la figura 38.



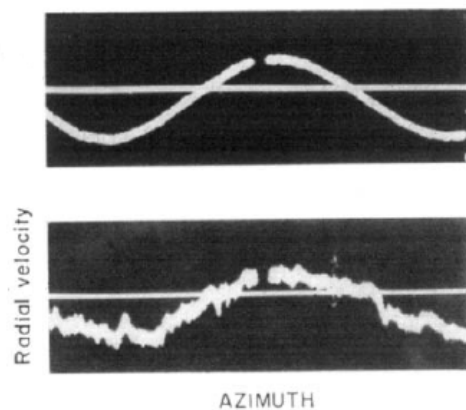
**Figura 38- Dos tipus de camps de vent i la seva corresponent velocitat radial**

Variant  $\theta_e$  i/o  $d$ , el radar VAD pot mesurar tant la divergència, direcció i velocitat com la deformació i dilatació. Per no contaminar els resultats excessivament hi ha un límit per l'angle  $\theta_e$ . Igual passa per amb el factor  $d$ . Aquestes limitacions restringeixen la màxima

altitud que pot ser aplicada aquesta tècnica. Pels límits baixos, el radar pot mostrejar alçades molt petites.

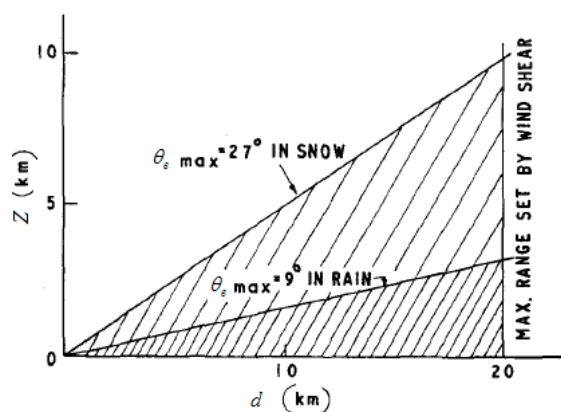
## 4.2 Limitacions del VAD

Fins ara s'ha assumit, per simplificar, que la velocitat de precipitació  $V_f$  és homogènia a l'àrea que estem rastrejant. En general, malauradament, no és el cas. Les fluctuacions de  $V_f$  són produïdes per moviments verticals de l'aire (ascendent o descendent) i per la mida de les partícules que precipiten. Les precipitacions verticals són, generalment, de l'ordre de 0,1 m/seg. Les variacions segons la forma de les partícules pot ser de 0,7 m/seg. en el cas de neu o de 2 m/seg. en cas de pluja. A la figura 39 es pot observar una velocitat radial amb atmosfera tranquil·la o amb turbulències.



**Figura 39- Velocitat radial obtinguda amb atmosfera tranquil·la i amb turbulències**

Per minimitzar els errors en el radar VAD, hi ha uns angles d'elevació màxim depenen si plou o neva, tal i com es pot observar a la figura 40. Hi ha dos línies dibuixades en aquesta imatge que són els límits de l'angle d'elevació en el cas de neu o pluja. Evidentment aquesta figura no es pot interpretar de manera estricta. Per exemple, si hi ha una raó per la qual podem creure que la velocitat de precipitació és relativament homogènia, els angles d'elevació es poden veure canviats.



**Figura 40- Angles permissius del radar VAD en cas de pluja o neu**

### 4.2.1 Aliasing

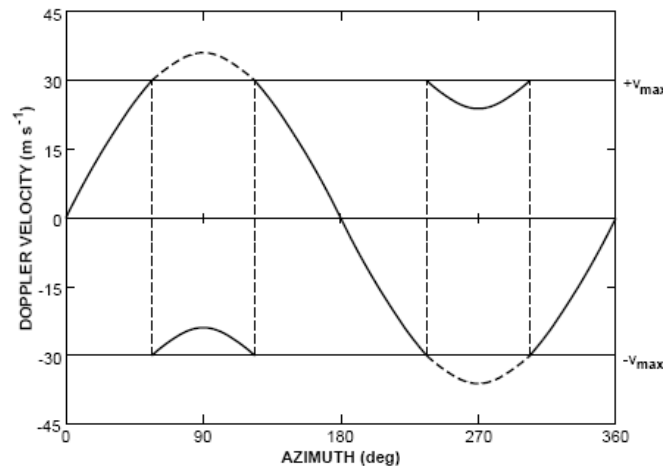
El interval per mesurar la màxima velocitat Doppler, anomenat interval Nyquist, és

$$V_{max} = \pm PRF \lambda / 4 \quad (4.25)$$

on  $\lambda$  és l'allargada d'ona del radar. Si  $PRF$  decreix,  $V_{max}$  també ho fa. Normalment es disminueix el  $PRF$  per alleujar problemes de distància amb el radar. Substituint l'equació 4.25 per  $r_{max} = c/(2 PRF)$  s'obté:

$$V_{max} r_{max} = \pm c \lambda / 8 \quad (4.26)$$

Donada una allargada d'ona del radar, el producte de  $V_{max}$  i  $r_{max}$  és una constant; es pot incrementar  $r_{max}$  i rebaixar  $V_{max}$ , i viceversa. Aquest és el compromís entre  $r_{max}$  i  $V_{max}$  anomenat "Dilema Doppler".



**Figura 41- Velocitat màxima Doppler**

Considerem un vent uniforme a una velocitat radial de 36 m/seg. a una alçada concreta a l'atmosfera. L'antena del radar rota 360° i la velocitat Doppler varia de manera sinusoidal tal i com es mostra a la figura 41.

El radar comença a mesurar, i la velocitat Doppler de +36 m/seg. (els valors positius representen flux de vent que s'allunya del radar) es produeix quan el radar es situa a 90°. A 270°, la velocitat Doppler és de -36 m/seg. (els valors negatius representen flux de vent que s'apropa al radar). Els punts on la velocitat val zero, a 0° i a 180°, és perquè el vent és perpendicular al "punt de vista del radar".

En el cas que  $V_{max}$  sigui  $\pm 30$  m/seg., per exemple, i el vent sigui de 36 m/seg., els valors de la velocitat Doppler que excedeixen els  $\pm 30$  m/seg. tindran aliasing. Les parts de la línia sòlida de la figura 41 representen la velocitat mesurada pel radar. Les velocitats excedents a  $\pm 30$  m/seg. tindran un offset de  $2 \cdot V_{max}$ , llavors +36 m/seg. serà  $+36 - 2 \times 30 = -24$  m/seg. i -36 m/seg. serà  $-36 + 2 \times 30 = +24$  m/seg.

És important visualitzar la presència d'aliasing per poder ajustar els paràmetres del radar.



## Capítol V: Mètodes i Algoritmes

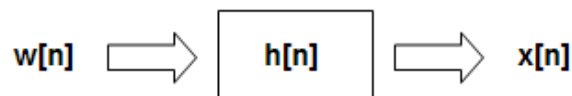
Aquest capítol està enfocat a la generació de les variables aleatòries que principalment, procedeixen del radar meteorològic com és el cas de  $V_{x0}$ ,  $V_{y0}$  i  $V_f$ . De manera que utilitzarem un procés AR per obtenir dades correlades, per la senzilla raó que el vent no canvia bruscament d'un segon a un altre sinó que dintre de la aleatorietat cada mostra depèn certa part de l'anterior.

El mètode utilitzat per Caton fa ús de la TF per l'estimació espectral. A l'apartat 5.2 es proposen diferents estimadors per una millora alhora de calcular la velocitat, direcció i divergència.

### 5.1 Obtenció de paràmetres aleatoris

Les variables  $V_{x0}$ ,  $V_{y0}$  i  $V_f$  no són conegudes a priori, és a dir, no són senyals deterministes.

Un procés AR es crea amb el filtrat del soroll gaussià blanc. L'entrada del sistema, que té una densitat espectral plana, passa pel filtre i s'aconsegueix un altre procés aleatori sense una densitat espectral plana.



**Figura 42- Filtre**

Si  $w[n]$  té una densitat espectral següent:

$$S_w(e^{j\omega}) \quad (5.1)$$

la sortida filtrada serà,

$$S_x(e^{j\omega}) = S_w(e^{j\omega}) \cdot |H(e^{j\omega})|^2 = K \cdot |H(e^{j\omega})|^2 \quad (5.2)$$

La TF de  $S_x(e^{j\omega})$  és:

$$R_x[k] = \mathcal{F}^{-1}[S_x(e^{j\omega})] \quad (5.3)$$

La sortida del filtre,  $X[n]$ , estarà correlat mostra a mostra si  $S_x(e^{j\omega})$  és estret, per tant,  $H[n]$  és un filtre pas baix amb un ample de banda petit.

### 5.1.1 Procés AR

En el nostre cas, on no és imprescindible disposar d'una resposta freqüencial amb una fase lineal, utilitzarem un filtre amb resposta impulsional de longitud infinita (filtres IIR). El seu principal avantatge està, en que per complir unes especificacions determinades, precisen d'un ordre inferior al requerit per un filtre FIR.

La relació entrada-sortida del filtre lineal, invariant, causal i estable amb resposta impulsional infinita pot ser expressada mitjançant l'equació de convolució o l'equació en diferències finites que descriuen el sistema:

$$Y[n] = \sum_{m=0}^{\infty} h[m]x[n-m] = \sum_{k=0}^Q b_k x[n-k] - \sum_{k=1}^P a_k y[n-k] \quad (5.4)$$

La mostra a la sortida a l'instant present s'obté per l'extracció de dos termes. El primer és una combinació lineal de la mostra actual a l'entrada del filtre i de les Q mostres anteriors a l'entrada. El segon és una combinació lineal de les P mostres anteriors a la sortida. Els P coeficients  $a_k$  i els Q+1 coeficients  $b_k$ , formen un conjunt finit d'incògnites del problema del disseny. La seva funció de transferència és,

$$H(z) = \frac{\sum_{k=0}^Q b_k z^{-k}}{1 + \sum_{k=1}^P a_k z^{-k}} \quad (5.5)$$

El polinomi numerador és de grau Q i el denominador de grau P. El màxim dels dos graus és l'ordre del filtre.

Dintre dels diferents ordres d'un filtre, trobem el tipus AR (Autoregressive process) amb cap zero i P polsos. En aquesta aplicació s'utilitza un filtre d'ordre 1, altrament dit, tindrà un pols (P=1). La figura 43 ens il·lustra un filtre IIR. La seva funció de transferència és:

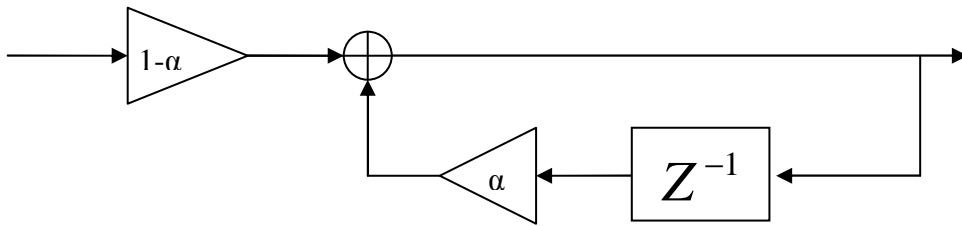
$$H(z) = \frac{b_0}{1 + \sum_{k=1}^P a_k z^{-k}} \quad (5.6)$$

on les constants  $a_k$  i  $b_k$  són els coeficients del filtre.

La sortida del filtre és:

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{b_0}{1 + \sum_{k=1}^P a_k z^{-k}} \rightarrow Y(z) = X(z) \sum_{k=1}^P a_k z^{-k} = b_0 X(z) \quad (5.7)$$

$$Y[n] = b \cdot x[n] - \sum_{k=1}^P a_k y[n-k] \quad (5.8)$$

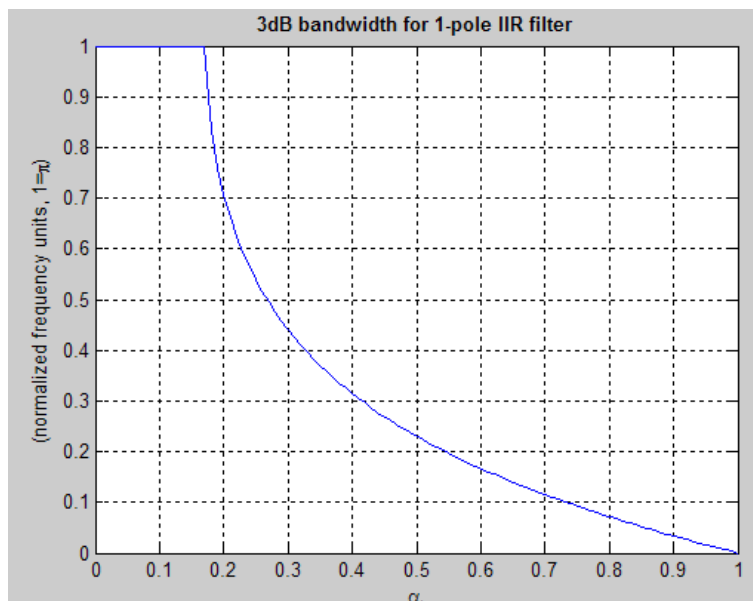


**Figura 43-Filtre IIR**

Els valor coeficient  $a_k$  és  $\alpha$  i el  $b_k$  és 1. De manera que tenim,

$$H(z) = \frac{1}{1 + \alpha \cdot z^{-1}} \quad (5.9)$$

El valor  $\alpha$  està entre 0 i 1. Em d'agafar un valor alt perquè l'ample de banda sigui estret, com s'il·lustra a la figura 44. A una  $\alpha$  pròxima a zero l'efecte del filtre és nul.



**Figura 44- Ample de Banda del filtre IIR**

Podem concloure que amb aquest mètode es pot extreure valors aleatòries de velocitats correlades entre si.

## 5.2 Estimació espectral

Al capítol IV s'ha presentat el mètode més usat per estimar l'espectre de  $V_r$ , la TF. En aquesta secció veurem com millorar la densitat espectral amb sistemes no paramètrics. Dintre d'aquests sistemes no paramètrics hi ha 3 mètodes: Periodograma, Bartlett i Blackman-Tukey. Malgrat que hi han estimadors destinats a processos AR, a aquest projecte s'emprenen aquests tres mètodes anteriors per simplificar els càlculs.

### 5.2.1 Mètodes No Paramètrics

#### 5.2.1.1 Periodograma

La potència espectral d'un procés estacionari és la TF de la autocorrelació,

$$P_x(e^{j\omega}) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} r_x(k) e^{-jk\omega} \quad (5.10)$$

En molts casos la  $x[n]$  no és infinita, sinó que està mesurada sobre un interval finit, anomenat  $N$ , per tant l'autocorrelació ha de ser una suma finita.

$$\hat{r}_x = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-k} x(n+k) x^*(n) \quad (5.11)$$

De manera que el periodograma és:

$$P_x(e^{j\omega}) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} r_x(k) e^{-jk\omega} \quad (5.12)$$

$X_n[n]$  es pot expressar com el producte de  $x[n]$  amb una finestra  $w[n]$ , assegurant que les mostres pertanyin al interval  $N$ .

$$x_n[n] = w[n] x[n] \quad (5.13)$$

L'autocorrelació es pot escriure com:

$$\hat{r}_x(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_n(n+k) x_n^*(-k) \quad (5.14)$$

Fem la TF i aconseguim l'expressió del periodograma:

$$\hat{P}_{per}(e^{j\omega}) = \frac{1}{N} X_N(e^{j\omega}) X_N^*(e^{j\omega}) = \frac{1}{N} |X_N(e^{j\omega})|^2 \quad (5.15)$$

### 5.2.1.2 Bartlett

El mètode Bartlett també és un estimador. La millora respecte el periodograma està en la disminució de la variància. Bàsicament tracta de fer un promig de varis periodogrames.

$X_i(n)$ , on  $i=1, 2, \dots, K$ , on  $K$  són les realitzacions d'un procés aleatori  $x(n)$  que està dintre un interval  $L$ .

$$\hat{P}_B = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{K-1} \left| \sum_{n=0}^{L-1} x(n+iL) e^{-jnw} \right|^2 \quad (5.16)$$

### 5.2.1.3 Blackman-Tukey

El mètode de Bartlett redueix la variància del periodograma. Un altre mètode per reduir la variabilitat del periodograma és el mètode Blackman-Tukey. Recordem que el periodograma es calcula amb la TF de l'autocorrelació  $\hat{r}_x(k)$ . Per dades finites, d'allargada  $N$ , la variància de  $\hat{r}_x(k)$  és molt gran per valors de  $k$  pròxims a  $N$ . Per pal·liar aquest efecte, em de reduir la contribució d'aquestes mostres al periodograma. Fins ara hem vist que Bartlett redueix la variància mitjançant el promig. Blackman-Tukey aplica una finestra a  $\hat{r}_x(k)$  per eliminar les mostres que augmenten la variància. L'espectre d'aquest mètode es,

$$\hat{P}_{BT}(e^{jw}) = \sum_{k=-M}^M \hat{r}_x(k) w(k) e^{-jk w} \quad (5.17)$$

on  $w(k)$  és la finestra que s'aplica a  $\hat{r}_x(k)$ . Les finestres poden ser rectangulars, Hamming, Bartlett o Blackman.

## Capítol VI: Simulacions i verificació de les dades

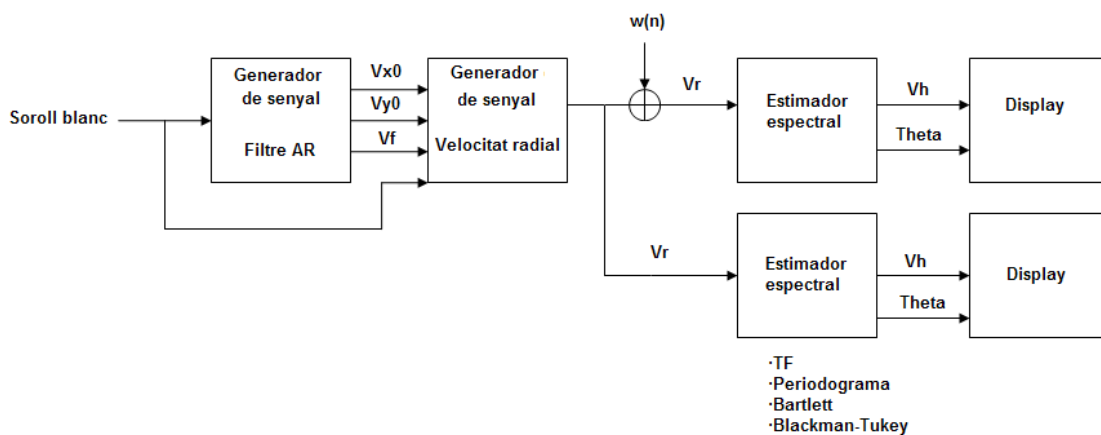
### 6.1 Simulacions

Aquesta secció està dedicada a la simulació dels mètodes i algorismes discutits als capítols IV i V. Al capítol IV es dedica a determinar les propietats cinètiques del vent, la velocitat, direcció i divergència mitjançant un radar Doppler. En aquest mateix capítol s'exposa el procediment actual per extreure la velocitat radial amb la TF com estimador espectral. En molts estudis on es calcula la velocitat radial dels aerosols s'utilitza aquest mètode. Es proposa al capítol V estimadors alternatius com el Periodograma, Bartlett o Blackman-Tukey.

Les simulacions es faran amb un escenari concret, amb una determinada zona, on es simularan diferents tipus de vent aplicant els diferents mètodes no paramètrics. Un cop obtingudes les dades les verificarem amb dades reals extretes de radars Doppler.

#### 6.1.1 Diagrama del processat de dades

El procediment d'extracció de dades està representat a la figura 45. Quatre blocs hi estan il·lustrats.



**Figura 45- Bloc software**

Branca superior de la figura 45: Al primer bloc es generen les dades  $V_{x0}$ ,  $V_{y0}$  i  $V_f$  a partir de soroll blanc filtrat obtingut a través del filtre AR (explicat al capítol V), aquestes mostres inicialment ens les proporciona el radar per després poder rastrejar i obtenir la velocitat radial. A la sortida del primer bloc per tant, tindrem tres vectors. Cada posició de cada vector  $V_{x0}$ ,  $V_{y0}$  i  $V_f$  conté el valor del vent per cada segon, tal i com es mostra a la figura 46. Suposem que el radar triga un segon a fer un gir de  $360^\circ$ . Per tant, dir que a cada segon s'extreu  $V_{x0}$ ,  $V_{y0}$  i  $V_f$  és el mateix que dir-ho per a cada volta.

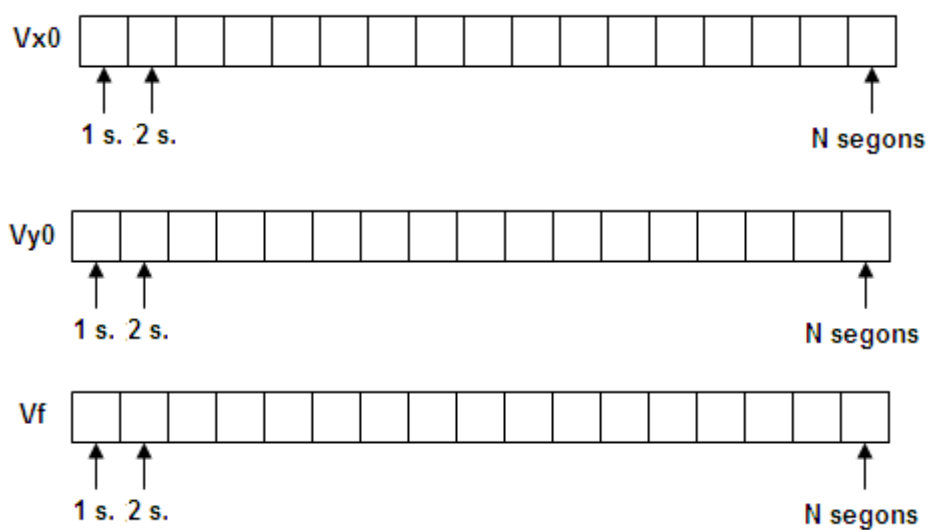


Figura 46-Vectors de velocitat

El segon bloc, el Generador de Senyal -Velocitat Radial-, agafa una posició de cada un dels tres vectors  $V_{x0}$ ,  $V_{y0}$  i  $V_f$ , i construeix la senyal  $V_r$ . El vector resultant tindrà 360 posicions, cada posició per angle de rotació del radar.

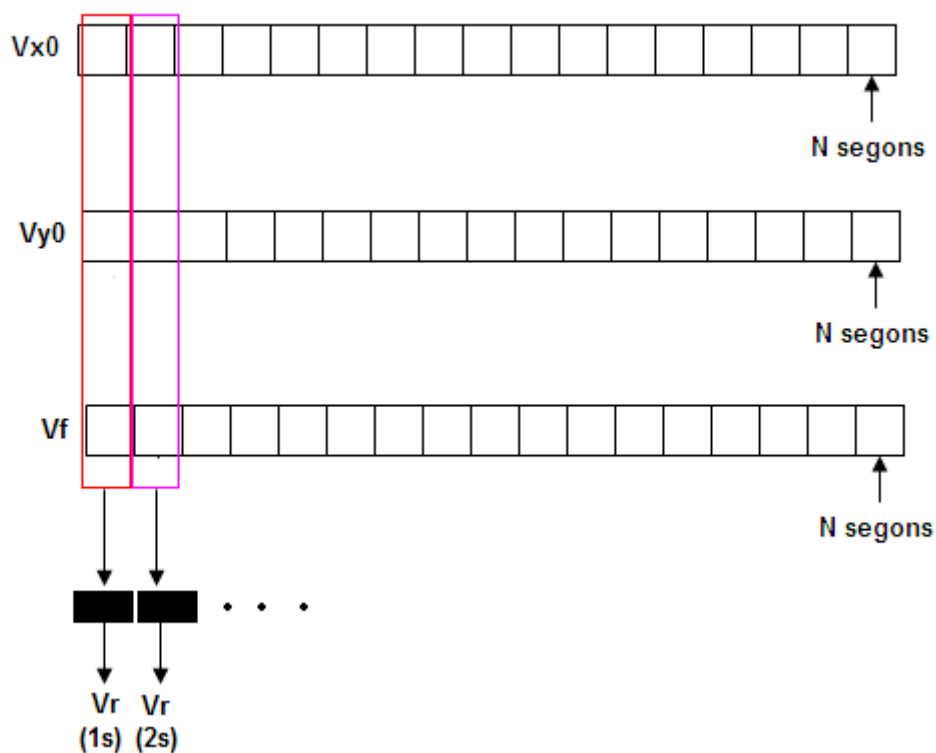
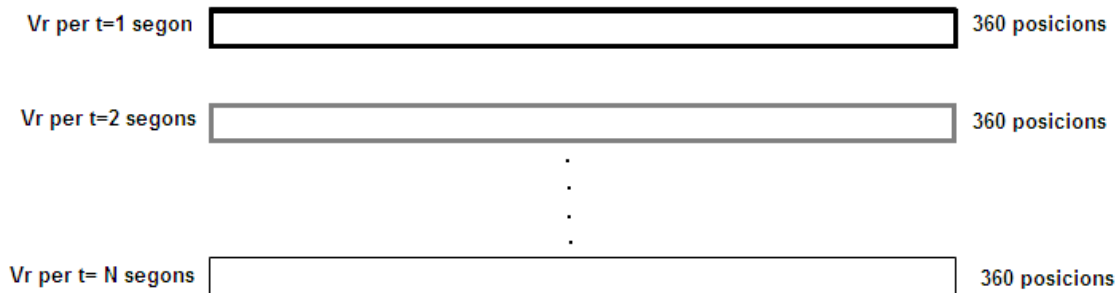


Figura 47- Bloc Generador de Senyal

La figura 47 ens mostra el procediment: un cop el segon bloc (il·lustrat amb la caixa negra) agafa una velocitat de cada vector ( $V_{x0}$ ,  $V_{y0}$  i  $V_f$ ) procedents del primer bloc, en calcula la velocitat radial.

Com a exemple demostratiu, si ens fixem en el primer segon, veiem que el segon bloc (caixa negra) agafa les velocitats de la primera posició dels vectors  $V_{x0}$ ,  $V_{y0}$  i  $V_f$ , emmarcades en el requadre vermell, on posteriorment el bloc calcularà la velocitat radial.

El resultat final del segon bloc per a cada segon és veu en la figura 48.



**Figura 48- Vectors resultants del bloc Generador de Senyal**

El bloc Estimador Espectral (tercer bloc) calcula l'estimació per cada vector que surt del segon bloc. A partir d'aquest bloc es pot obtenir el Periodograma, Bartlett,... Per tant, aconseguim els valors dels coeficients de Fourier, i els substituïm a les equacions 4.7, 4.8 i 4.10, de manera que per cada vector  $V_r$ , aconseguim l'angle, la divergència i el mòdul del vent radial. Un cop obtinguts aquests valors, es pinten en l'últim bloc per poder visualitzar el vent a cada volta.

La branca inferior de la figura 45: fa la mateixa funció que la superior, és a dir, també calcula la velocitat i direcció, no obstant, les dades no estan contaminades pel canal no ideal. Utilitzem aquesta branca per comparar els mapes que haurien de sortir sense presència de soroll i els que surten amb presència de soroll.

## 6.1.2 Caracterització del canal

L'avaluació de les condicions atmosfèriques de l'emplaçament per a la instal·lació dels aerogeneradors és totalment necessària per tenir una visió quantitativa i qualitativa de la capacitat energètica eòlica en el punt d'estudi.

### 6.1.2.1 Model estadístic de distribució de la velocitat del vent

Degut a les característiques tan disperses i aleatòries de l'energia eòlica, és obvi que l'única manera de determinar les propietats de l'emplaçament és utilitzant l'estadística, per tant, és important conèixer la distribució de probabilitats de velocitats del vent ja que permet saber el potencial eòlic disponible.



Les expressions analítiques més utilitzades per a disposar d'una similitud amb les distribucions reals mesurades són les corresponents al model de distribució de Weibull, que indiquen la probabilitat del valor de la desviació dels valors momentanis de les velocitats del vent. El seu coneixement permet un càlcul relativament exacte del rendiment que teòricament es pot obtenir de la turbina de l'aerogenerador.

### 6.1.2.2 Distribució de Weibull

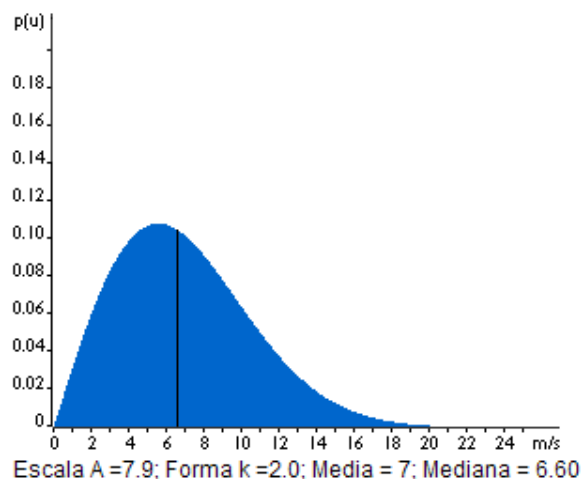
Les variacions de la velocitat del vent al llarg de l'any poden ser caracteritzades en termes de distribució de probabilitat. El model de distribució de Weibull dóna una bona representació de la variació horària de la velocitat mitja del vent durant un any.

Si es mesura la velocitat del vent al llarg d'un any s'observa que les ratxes fortes són rares, mentre que els vents moderats són bastants comuns.

La funció de densitat de probabilitat de Weibull és:

$$f(V) = \frac{k}{C} \left( \frac{V}{C} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{C}\right)^k} \quad (6.1)$$

Apareixen tres paràmetres, el factor d'escala  $C$  [m/s], el factor de forma  $k$  i la velocitat del vent  $V$ . A la pràctica, el valor del paràmetre  $k$  té valor 2 (la majoria dels fabricants d'aerogeneradors fan servir aquest valor en els gràfics de rendiment per a les seves màquines) de manera que la funció Weibull és una funció Rayleigh com la de la figura 49.

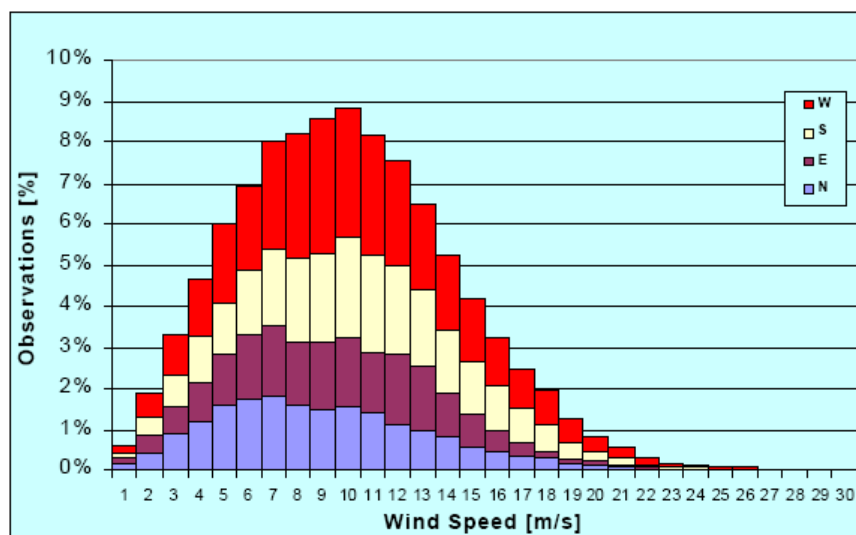


**Figura 49- Funció Weibull**

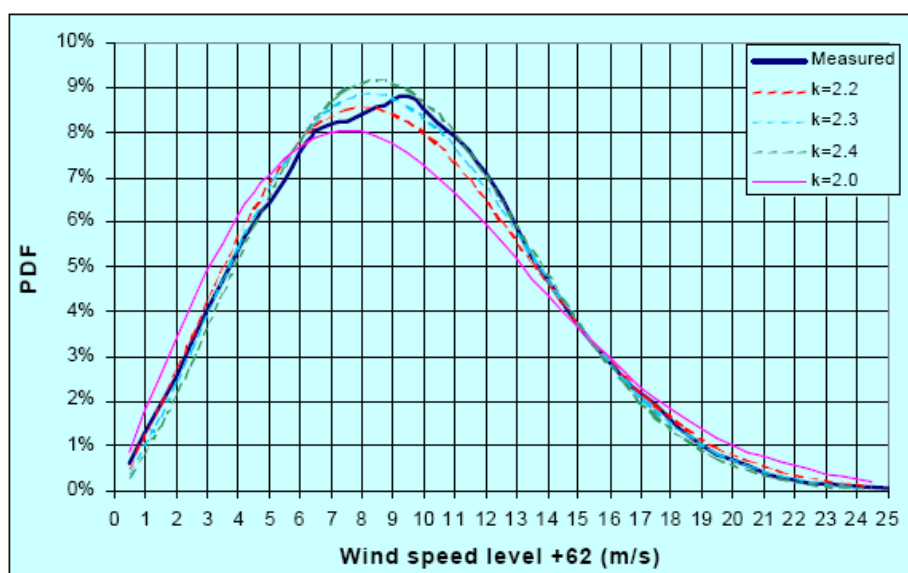
#### 6.1.2.2.1 Determinació dels paràmetres de forma i escala

La generació dels paràmetres  $V_{x0}$ ,  $V_{y0}$  i  $V_f$  s'ha creat amb les mateixes característiques que els histogrames reals dels emplaçaments, on la velocitat del vent segueix la distribució Weibull, en el nostre cas, amb  $k=2$ .

Les dades per a les simulacions s'han extret de les figures 50 i 51. Les mesures estan fetes a 62 metres sobre el nivell del mar al parc eòlic marítim de Horns Rev (Dinamarca). La mitjana de velocitat del vent és de 9,7 m/s.



**Figura 50-** Distribució de la velocitat del vent a 62 metres per sobre del nivell del mar, al parc eòlic marítim de Horns Rev



**Figura 51-** Distribució de la velocitat del vent amb diferents valors del paràmetre  $k$ , al parc eòlic marítim de Horns Rev

Hvide Sande				Horns Rev		
Sector	A	k	%	A	k	%
mean	8.06	2.24	100.0	11.05	2.34	100.0
N	5.49	1.92	3.8	8.71	2.08	3.8
NNE	6.54	2.08	4.3	9.36	2.22	4.3
ENE	7.55	2.46	5.5	9.29	2.41	5.5
E	8.68	2.79	8.3	10.27	2.37	8.3
ESE	8.14	2.43	8.7	10.89	2.51	8.7
SSE	6.84	2.38	6.7	10.49	2.75	6.7
S	7.33	2.41	8.4	10.94	2.61	8.4
SSW	7.91	2.50	10.5	11.23	2.51	10.5
WSW	8.70	2.34	11.4	11.93	2.33	11.4
W	8.89	2.20	12.2	11.94	2.35	12.2
WNW	9.30	2.32	13.9	12.17	2.58	13.9
NNW	6.99	2.03	6.1	10.31	2.01	6.1
Mean Wind Speed Hvide Sande 7.1 m/s						
Mean Wind Speed Horns Rev 9.7 m/s						

**Taula 3- Factors d'escala i forma mesurats a Hvide Sande i a Horns Rev a 62 metres sobre el nivell del mar**

A la figura 50 i a la taula 3 s'observa que els vents forts són estranys, mentre que els vents moderats són bastant habituals. La velocitat del vent mitjà o el paràmetre d'escala  $C$  solen indicar com de ventós és, en promig, l'emplaçament. El paràmetre de forma  $k$  indica com de punxeguda és la distribució de velocitats, és a dir, un valor elevat de  $k$ , com ara 2,5 ó 3, indica una zona on la variació horària de la mitja de la velocitat respecte a la mitja anual és petita, i la distribució serà molt punxeguda. Valors petits de  $k$ , com ara 1,5 ó 1,2, indica una major variabilitat respecte a la mitja anual.

### 6.1.3 Simulació en diferents entorns

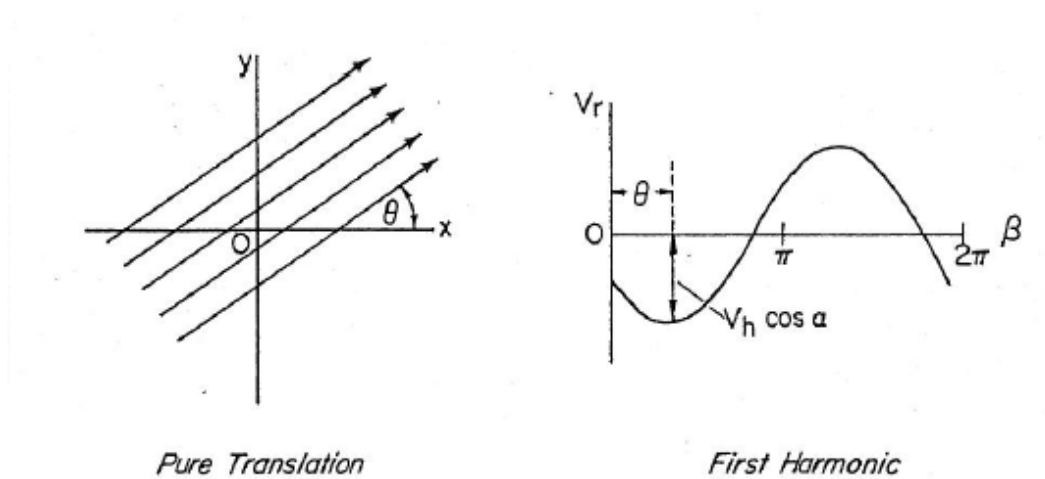
#### 6.1.3.1 Vent Horitzontal Lineal

Suposem que el vent té un caràcter només horitzontal. L'expressió 4.5 queda reduïda a:

$$V_r = V_{x0} \cos \theta_e \cos \phi + V_{y0} \cos \theta_e \sin \phi \quad (6.2)$$

L'equació 6.2 només contribueix en el primer coeficient de la sèrie de Fourier  $C_1$ . Tots els altres coeficients són zero.

Donat un angle  $\theta_e$ ,  $V_{x0}$  i  $V_{y0}$ , la velocitat radial esdevindrà una funció sinusoidal amb un desfasament igual a l'angle de direcció del vent com el de la figura 52.



**Figura 52- Vent Horitzontal Lineal**

La velocitat del vent i la direcció es dedueixen a partir de l'estimació espectral de la velocitat radial.

Malgrat el número finit de mostres, s'ha utilitzat durant moltes dècades la TF com estimador. Aplicarem els diferents mètodes no paramètrics per obtenir una millor precisió de les dades d'interès.

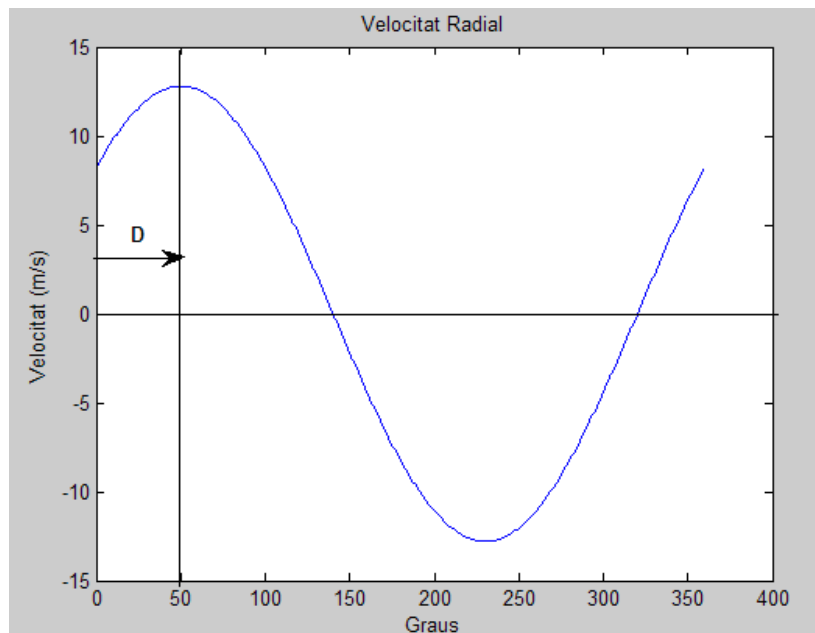
A continuació es simularan diferents escenaris amb Matlab, i s'estudiaran els resultats de cada estimador amb canals amb poc o molt soroll per comprovar la robustesa d'aquests.

Primer escenari- SNR alt

Posem el cas :

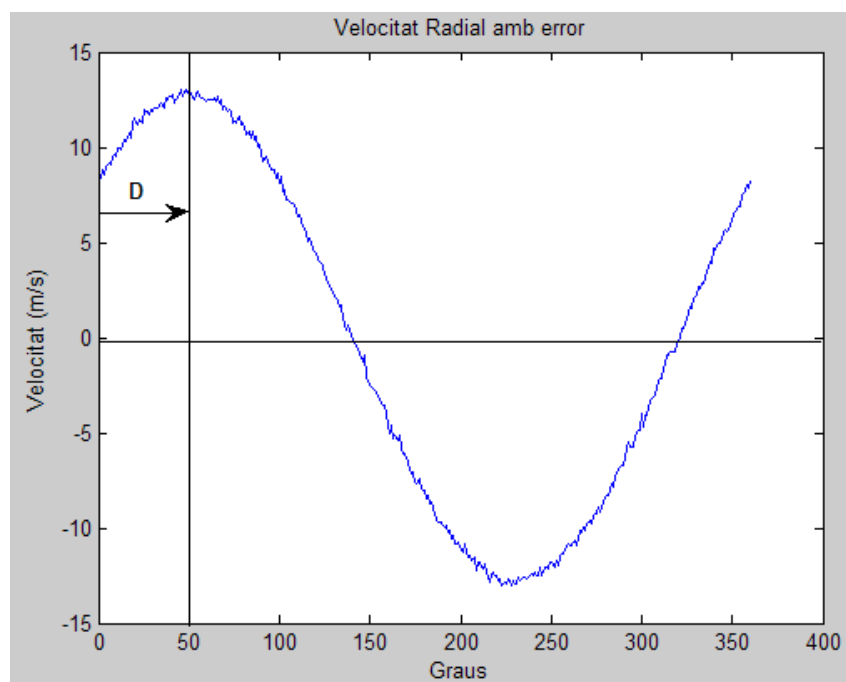
$$V_{x0} = 10 \text{ m/s}, V_{y0} = 12 \text{ m/s} \text{ i } \theta_e = 35^\circ.$$

La velocitat radial sense soroll serà:



**Figura 53- Velocitat radial pel primer escenari**

La figura 53, és el resultat d'aplicar els valors anteriors a l'equació 6.2. Aquesta figura representa la velocitat radial obtinguda quan el canal és no ideal (gaussià). La potència del soroll és relativament petita en aquest canal.



**Figura 54- Velocitat radial amb soroll pel primer escenari**

La forma sinusoidal de la  $V_r$  a la figura 54 és deguda a la rotació del radar. El mòdul del vent a  $50^\circ$  és el mateix que el de  $50^\circ + 180^\circ$  però amb el signe canviat. La velocitat radial real és quan la sinusoide agafa el valor màxim, en aquest cas és de 12,8 m/s.

El següent pas és extreure la direcció i velocitat del vent. Comencem amb els mètodes no paramètrics.

Per l'extracció del coeficient  $C_1$  de cada mètode, s'ha calculat el vector  $V_r$  100 cops per tal de minimitzar l'efecte de variabilitat de la variable aleatòria soroll. Si només simuléssim una vegada, els resultats serien concrets ja que només ens donarien informació sobre l'estimació en un estat concret del canal.

Amb els mètodes de: Periodograma, Bartlett i Blackman-Tukey no es pot extreure el valor de la direcció del vent degut a que el resultat d'aquests mètodes són potències, per tant, no s'obté els coeficients  $a_1$  i  $b_1$ .

#### ❖ Mètode Transformada de Fourier

S'aplica la TF als 100 vectors  $V_r$  i a continuació es fa el promig, el resultat serà un vector de 360 posicions. De fet, tindrem:

n	1	2	3	4	...	180	181	182	183	...	360
$\Im[V_r]$	$c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	...	$c_{179}$	$c_{-179}$	$c_{-178}$	$c_{-177}$	...	$c_{-1}$

El primer coeficient  $C_1$  val  $4.1819 - 4.8441i$ . Els valors del vector  $V_r$  formen un sinus. La TF d'un sinus són dos deltes multiplicades per un factor  $\frac{1}{2}$ , de manera que els coeficients s'han de multiplicar per 2. Per comprovar si la TF és un bon estimador, substituïm el coeficient  $C_1$  a l'equació 6.3:

$$a_1 = V_{x0} \cos \theta_e \quad (6.3)$$

$$b_1 = V_{y0} \cos \theta_e \quad (6.4)$$

Aïllem,

$$V_{x0} = 10.2079 \text{ m/s}$$

$$V_{y0} = 11.8237 \text{ m/s}$$

Observem que els valors obtinguts són quasi bé els mateixos que els introduïts ( $V_{x0} = 10 \text{ m/s}$ ,  $V_{y0} = 12 \text{ m/s}$ ). D'aquesta manera comprovem que té relació el què introduïm amb els resultats.

Calculem la velocitat i direcció,

$$V_h = \frac{2|C_1|}{\cos \theta_e} = 15,4223 \text{ m/s}$$

$$D = \arg C_1 - \pi = 49,19^\circ$$

#### ❖ Mètode Periodograma

Amb aquest mètode, es calcula el valor absolut del quadrat de la TF dels 100 vectors  $V_r$  i es fa el promig. Els coeficients es troben en forma de potència (elevat al quadrat). Per extreure el valor de  $C_1$  cal fer l'arrel d'aquest.

$$C_1 = \frac{\sqrt{5,308 \cdot 10^6}}{360} \times 2 = 12,799$$

Velocitat radial:

$$V_h = \frac{2|C_1|}{\cos \theta_e} = 15,6256 \text{ m/s}$$

#### ❖ Mètode Bartlett

Bartlett necessita, per exemple, 500 vectors  $V_r$ , on a cada 5 vectors es fa un promig, de manera que ens queden 100 vectors. Un cop obtinguts els 100 vectors es torna a fer el promig. Per cada segon obtenim diferents coeficients:

$$\text{Segon 1} = 5,2868 \cdot 10^6$$

$$\text{Segon 2} = 5,2859 \cdot 10^6$$

$$\text{Segon 3} = 5,2872 \cdot 10^6$$

$$\text{Segon 4} = 5,2839 \cdot 10^6$$

$$\text{Segon 5} = 5,3026 \cdot 10^6$$

.

.

.

$$\text{Segon 500} = 5,1881 \cdot 10^6$$

El coeficient  $C_1$  és la mitja dels 100 segons, i té el valor  $5,3048 \cdot 10^6$ . Com s'ha comentat al mètode anterior, el coeficient està expressat en forma de potència, per això s'ha de fer l'arrel quadrada.

$$C_1 = \frac{\sqrt{5,3048 \cdot 10^6}}{360} \times 2 = 12,4657$$

Velocitat radial:

$$V_h = \frac{2|C_1|}{\cos \theta_e} = 15,2188 \text{ m/s}$$

#### ❖ Mètode Blackman-Tukey

Blackman-Tukey aplica la TF a l'autocorrelació d'una senyal prèviament multiplicada per una finestra. L'allargada de la nostra finestra serà de 719 posicions.

El primer coeficient,  $C_1 = \frac{\sqrt{5,2733 \cdot 10^7}}{719}$ , no el multipliquem per dos ja que es calcula la TF de l'autocorrelació de la velocitat radial. Els dos coeficients es divideixen per 719, número total de mostres de l'autocorrelació de dos vectors, cadascun de 360 posicions. La velocitat radial és:

$$V_h = 2|C_1|/\cos \theta_e = 12,3303 \text{ m/s}$$

Com s'ha dit anteriorment, Blackman-Tukey utilitza finestres per l'autocorrelació. Abans s'ha utilitzat la finestra Hamming, no obstant, també es computaran per les finestres Bartlett, i Blackman.

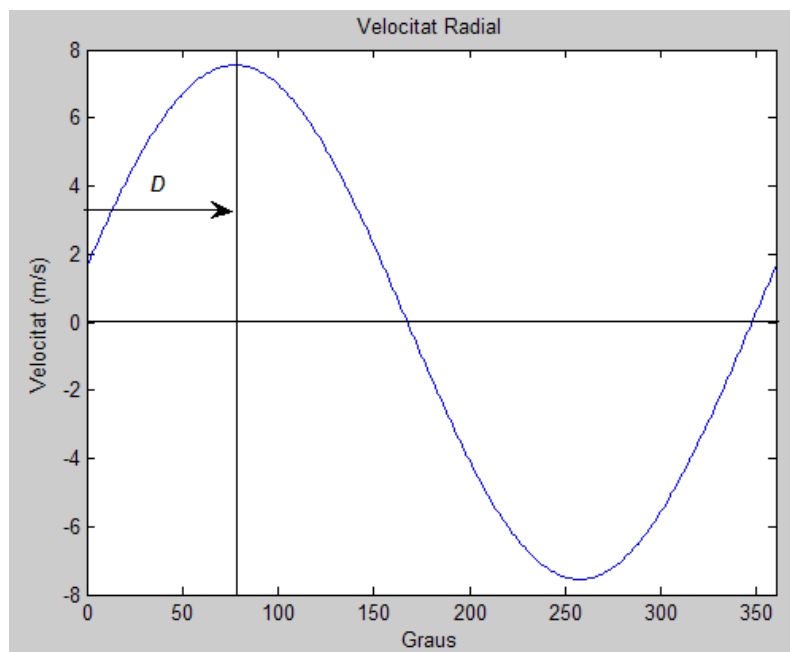
### Segon escenari- SNR baix

Posem el cas:

$$V_{x0} = 2 \text{ m/s}, V_{y0} = 9 \text{ m/s} \text{ i } \theta_e = 35^\circ.$$

En aquest escenari el canal gaussià introdueix molt més soroll.

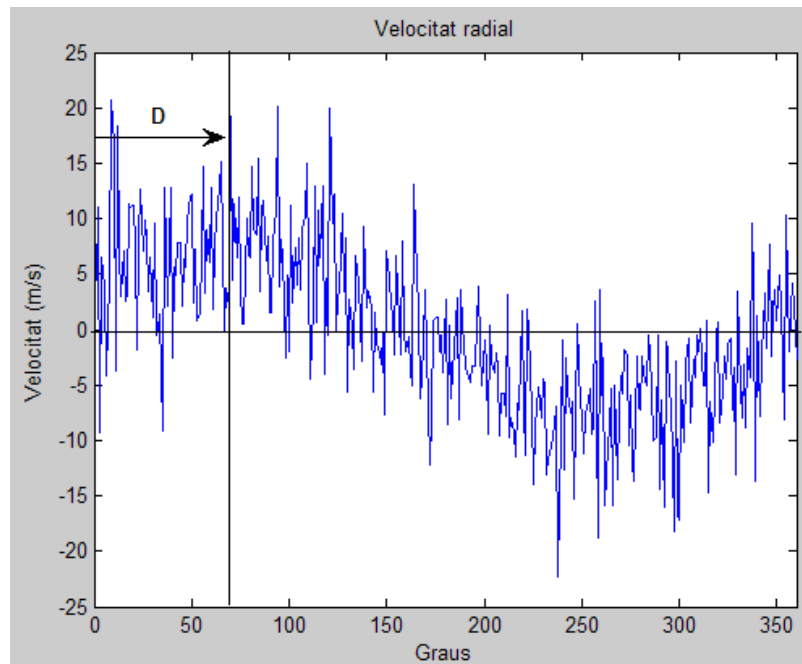
La velocitat radial serà:



**Figura 55- Velocitat radial pel segon escenari**

La figura 55 és el resultat d'aplicar els valors anteriors a l'equació 6.2. La figura 55 és la velocitat radial obtinguda quan el canal no és ideal (gaussià). La potència del soroll és més gran en aquest canal.





**Figura 56- Velocitat radial amb soroll pel segon escenari**

❖ **Mètode Transformada de Fourier**

El primer coeficient val  $0,9223 - 4,0561i$ . La TF d'un sinus són dos deltes multiplicades per un factor  $\frac{1}{2}$ , per tant els coeficients s'han de multiplicar per 2. Per comprovar si la TF és un bon estimador, substituïm el coeficient  $C_1$  a l'equació 6.3 i 6.4.

Aïllem,

$$V_{x0} = 1,125 \text{ m/s}$$

$$V_{y0} = 4,9519 \text{ m/s}$$

Si comparem els resultats anteriors amb els introduïts per nosaltres ( $V_{x0} = 2 \text{ m/s}$ ,  $V_{y0} = 9 \text{ m/s}$ ), veurem que no hi ha una certa relació amb el que s'ha introduït i els resultats de l'estimació. Calculem la velocitat i direcció,

$$V_h = \frac{2|C_1|}{\cos \theta_e} = 9,3631 \text{ m/s}$$

$$D = \arg C_1 - \pi = 73,25^\circ$$

❖ **Mètode Periodograma**

Amb aquest mètode, els coeficients es troben en forma de potència (elevat al quadrat). Per extreure el valor de  $C_1$  cal fer l'arrel d'aquest.

$$C_1 = \frac{\sqrt{1,7054 \cdot 10^6}}{360} \times 2 = 7,255$$

Velocitat radial:

$$V_h = \frac{2|C_1|}{\cos \theta_e} = 8,8573 \text{ m/s}$$

#### ❖ Mètode Bartlett

Bartlett necessita, per exemple, 500 vectors  $V_r$ , cada 5 vectors es fa un promig, de manera que ens queden 100 vectors. Un cop obtinguts els 100 vectors es torna a fer el promig. Per cada segon obtenim diferents coeficients:

$$\text{Segon 1} = 1,8908 \cdot 10^6$$

$$\text{Segon 2} = 1,8601 \cdot 10^6$$

$$\text{Segon 3} = 1,8440 \cdot 10^6$$

$$\text{Segon 4} = 1,8618 \cdot 10^6$$

$$\text{Segon 5} = 1,8096 \cdot 10^6$$

.

.

.

$$\text{Segon 500} = 1,8495 \cdot 10^6$$

El coeficient  $C_1$  és la mitja dels 100 vectors, i té el valor  $1,853 \cdot 10^6$

$$C_1 = \frac{\sqrt{1,853 \cdot 10^6}}{360} \times 2 = 7,56$$

Velocitat radial:

$$V_h = \frac{2|C_1|}{\cos \theta_e} = 9,2296 \text{ m/s}$$

#### ❖ Mètode Blackman-Tukey

Blackman-Tukey aplica la TF a l'autocorrelació prèviament multiplicada per una finestra de 719 mostres.

El primer coeficient,  $C_1 = \frac{\sqrt{9,1590 \cdot 10^6}}{719}$ , no els multipliquem per dos perquè es

calcula la TF de l'autocorrelació de la velocitat radial. Els dos coeficients es divideixen per 719, número total de mostres de l'autocorrelació de dos vectors, cadascun de 360 posicions.

$$C_1 = 4,20915$$

Velocitat radial:

$$V_h = \frac{2|C_1|}{\cos \theta_e} = 5,13874 \text{ m/s}$$

Com s'ha dit anteriorment, Blackman-Tukey utilitza finestres per l'autocorrelació. Abans s'ha utilitzat la finestra Hamming, també es computaran per una finestra Bartlett i Blackman.

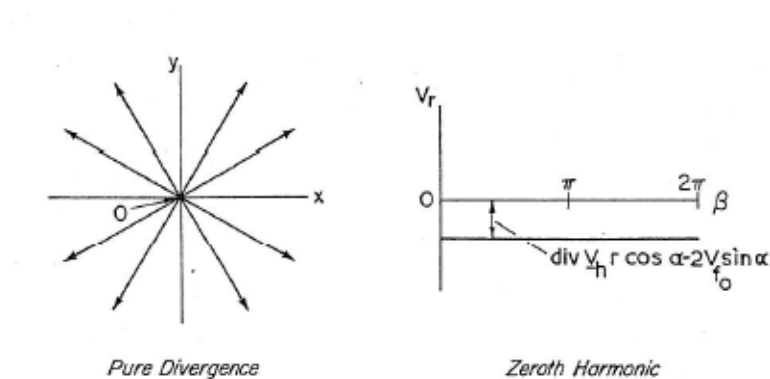
### 6.1.3.2 Vents de Pura Divergència

Suposem que el vent té un caràcter només divergent. L'expressió 4.5 queda reduïda a:

$$V_r = Vf \sin \theta_e + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) r \cos^2 \theta_e \quad (6.5)$$

L'equació 6.5 només contribueix en el coeficient de Fourier  $C_0$ . Tots els altres coeficients són zero.

Donat  $\theta_e$ ,  $Vf$  i  $\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y}$ , la velocitat radial esdevindrà una constant per a tots els angles de rastreig. De manera que s'obté una línia recta tal i com s'il·lustra a la figura 57.



**Figura 57- Vent Divergent**

La part dreta de figura 57 s'entén com un offset que pateix la velocitat radial fent-la pujar o baixar. Segons la naturalesa de la divergència esdevindrà un offset positiu o negatiu.

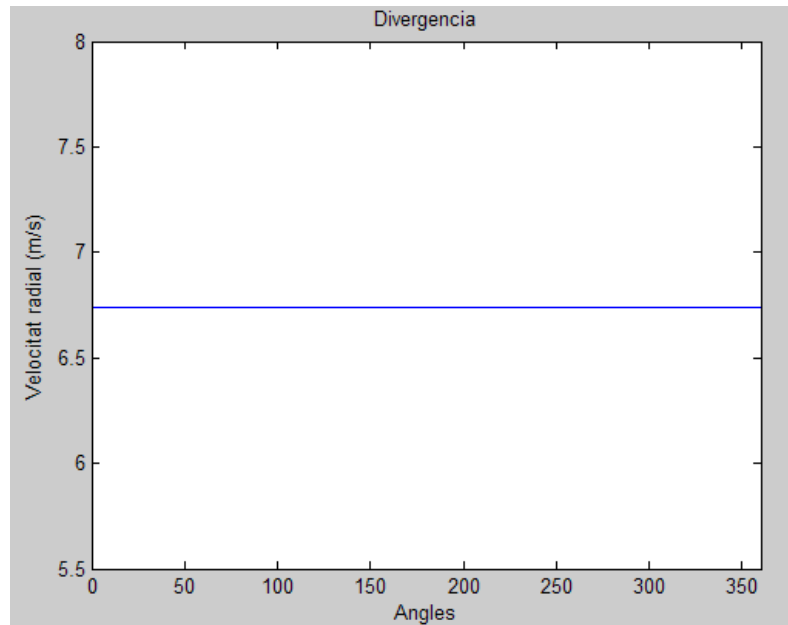
El valor de la divergència es dedueix a partir de l'estimació espectral de la velocitat radial. Igual que a l'apartat anterior, fins ara s'ha utilitzat la TF. Aplicarem els diferents mètodes no paramètrics per obtenir una millor precisió de les dades d'interès.

### Primer escenari- SNR alt

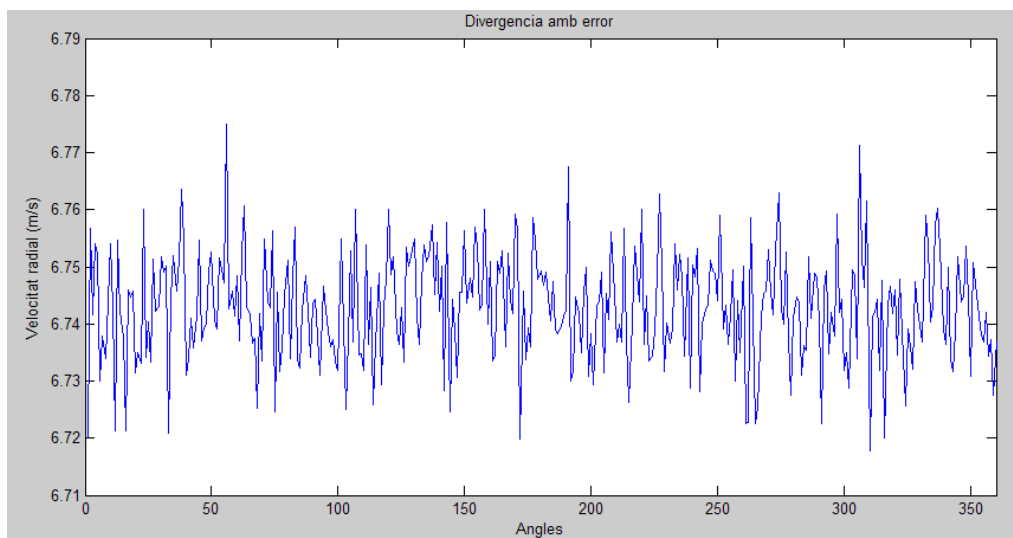
Posem el cas:

$V_f = 10 \text{ m/s}$ ,  $\text{radi} = 1 \text{ Km}$ ,  $\theta_e = 35^\circ$  i una divergència de  $3 \cdot \text{sec}^{-1}$ .

Aconsegum:



**Figura 58- Velocitat radial pel primer escenari**

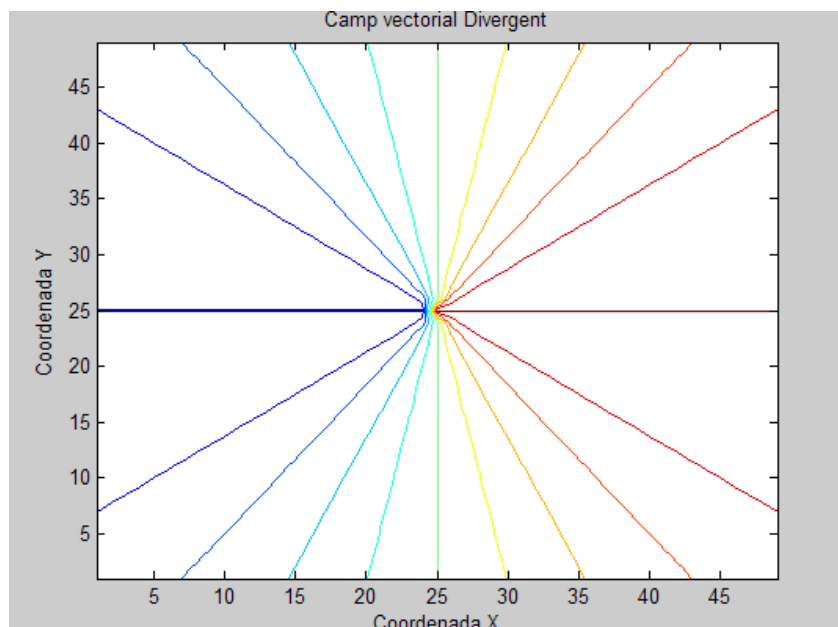


**Figura 59- Velocitat radial amb soroll pel primer escenari**

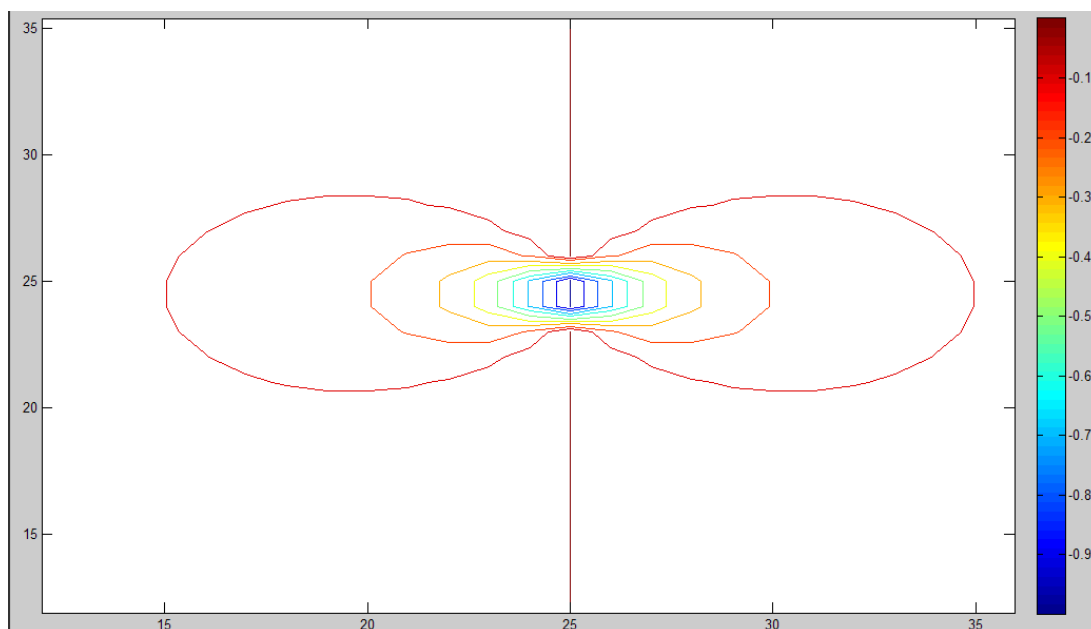
L'equació 6.5 no té cap relació amb l'angle  $\theta_e$ , per tant la divergència tindrà el mateix valor per tots els angles de rotació. El concepte de divergència d'un camp vectorial, o altrament dit, camp de vent, és la quantitat de flux que surt o entra a una superfície. Si la divergència és positiva s'entén que els camps surten d'un punt, però si és negativa expressa un flux que entra a una superfície. A la pràctica, la divergència positiva significa que hi ha un centre d'altra pressió i sol donar lloc a bon temps, tot el contrari quan s'observa divergència negativa ja que indica la presència de baixes pressions i per tant mal temps (pluja,...).

La divergència no és un vector, sinó un escalar. Amb l'operador divergència, s'aplica un camp de vent i en surt la seva divergència.

La imatge 61 ens rebel·la la divergència del camp vectorial de la figura 60. El centre és on el camp vectorial adquireix el seu valor màxim i a mesura que es va augmentant la distància respecte al centre, va decreixent.



**Figura 60- Camp divergent**



**Figura 61- Divergència del camp**

#### ❖ Mètode Transformada de Fourier

El coeficient  $C_0$  val  $\frac{2,4722 \cdot 10^3}{360}$ . En el cas anterior es multiplicava la TF per un factor 2, però la TF d'un pols finit, o una recta, és simplement una delta, de manera que no cal multiplicar-lo. Substituïm el coeficient  $C_0$  a l'equació 4.22:

$$Div = \frac{2}{r \cos^2 \theta_e} (C_0 - Vf \sin \theta_e) = 2,9978/s$$

#### ❖ Mètode Periodograma

Amb aquest mètode, els coeficients estan en forma de potència (elevat al quadrat). Per extreure el valor de  $C_0$  cal fer l'arrel d'aquest.

$$C_0 = \frac{\sqrt{5,8937 \cdot 10^6}}{360} = 6,7435$$

$$Div = \frac{2}{r \cos^2 \theta_e} (C_0 - Vf \sin \theta_e) = 3,004/s$$

#### ❖ Mètode Bartlett

Bartlett necessita, per exemple, 500 vectors  $V_r$ , cada 5 vectors es fa un promig, de manera que ens queden 100 vectors. Un cop obtinguts els 100 vectors es torna a fer el promig. Per cada segon obtenim diferents coeficients:

$$\text{Segon 1} = 5,8922 \cdot 10^6$$

$$\text{Segon 2} = 5,8912 \cdot 10^6$$

$$\text{Segon 3} = 5,8917 \cdot 10^6$$

$$\text{Segon 4} = 5,8927 \cdot 10^6$$

$$\text{Segon 5} = 5,8912 \cdot 10^6$$

.

.

.

$$\text{Segon 500} = 1,8495 \cdot 10^6$$

El coeficient  $C_0$  és la mitja dels 100 vectors, i té el valor  $5,8918 \cdot 10^6$

$$C_0 = \frac{\sqrt{5,8918 \cdot 10^6}}{360} = 6,7425$$

$$Div = \frac{2}{r \cos^2 \theta_e} (C_0 - Vf \sin \theta_e) = 2,9999/s$$

#### ❖ Mètode Blackman-Tukey

Blackman-Tukey aplica la TF a l'autocorrelació prèviament multiplicada per una finestra Hamming.

$$C_0 = \frac{\sqrt{19,5381 \cdot 10^6}}{719} = 6,1477$$

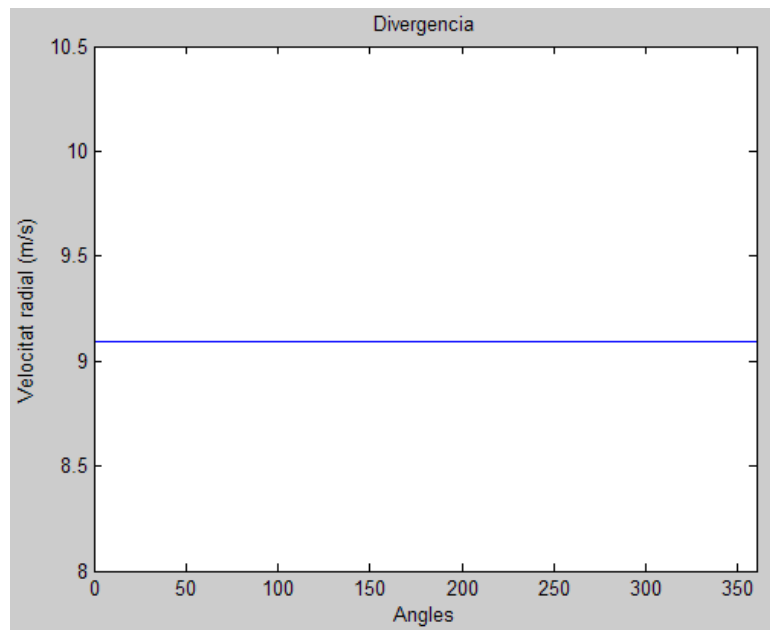
$$Div = \frac{2}{r \cos^2 \theta_e} (C_0 - Vf \sin \theta_e) = 2,98058 / \text{seg.}$$

Segon escenari- SNR baix

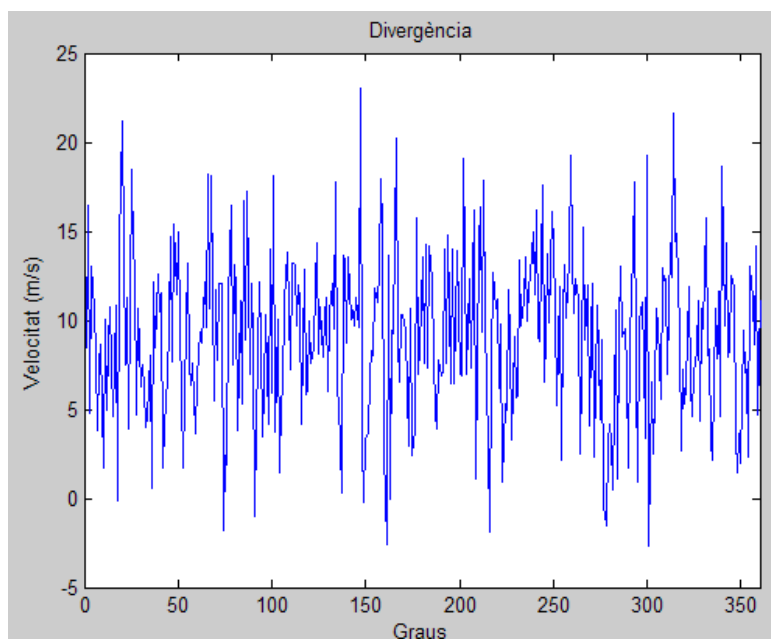
Posem el cas:

$Vf = 10 \text{ m/s}$ , divergència=10 i  $\theta_e = 35^\circ$ .

En aquest escenari el canal gaussià introdueix molt soroll . La velocitat radial serà:



**Figura 62- Velocitat radial pel segon escenari**



**Figura 63- Velocitat radial amb soroll pel segon escenari**

## ❖ Mètode Transformada de Fourier

El coeficient  $C_0$  val  $\frac{3,4390 \cdot 10^3}{360}$ . En el cas anterior es multiplicava la TF per un factor 2, però la TF d'un pols finit, o una recta, és simplement una delta, de manera que no cal multiplicar-lo. Substituïm el coeficient  $C_0$  a l'equació 4.22:

$$Div = \frac{2}{r \cos^2 \theta_e} (C_0 - Vf \sin \theta_e) = 10,6344/s$$

## ❖ Mètode Periodograma

Amb aquest mètode, els coeficients estan en forma de potència (elevat al quadrat). Per extreure el valor de  $C_0$  cal fer l'arrel d'aquest.

$$C_0 = \frac{\sqrt{1,0708 \cdot 10^7}}{360}$$

$$Div = \frac{2}{r \cos^2 \theta_e} (C_0 - Vf \sin \theta_e) = 10,624/s$$

## ❖ Mètode Bartlett

Es fa el mateix procediment que a l'apartat anterior.

$$\text{Segon 1} = 1,0708 \cdot 10^7$$

$$\text{Segon 2} = 1,0710 \cdot 10^7$$

$$\text{Segon 3} = 1,0708 \cdot 10^7$$

$$\text{Segon 4} = 1,0719 \cdot 10^7$$

$$\text{Segon 5} = 1,0707 \cdot 10^7$$

.  
.  
.

$$\text{Segon 500} = 1,0712 \cdot 10^7$$

El coeficient  $C_0$  és la mitja dels 5 segons, i té el valor  $1,07104 \cdot 10^7$ .

$$C_0 = \frac{\sqrt{1,07104 \cdot 10^7}}{360} = 9,0907$$

$$Div = \frac{2}{r \cos^2 \theta_e} (C_0 - Vf \sin \theta_e) = 10,624/s$$

## ❖ Mètode Blackman-Tukey

Blackman-Tukey aplica la TF a l'autocorrelació prèviament multiplicada per una finestra Hamming.

$$C_0 = \frac{\sqrt{64,56 \cdot 10^6}}{719} = 11,1724$$

$$Div = \frac{2}{r \cos^2 \theta_e} (C_0 - Vf \sin \theta_e) = 10,8842 /seg.$$



### 6.1.3.3 Vents de Translació i Divergència

Suposem que el vent té un caràcter horitzontal i divergent. L'expressió de la velocitat radial serà la combinació de l'apartat 6.1.3.1 i 6.1.3.2.

$$V_r = V_{x0} \cos \theta_e \cos \phi + V_{y0} \cos \theta_e \sin \phi + Vf \sin \theta_e + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) r \cos^2 \theta_e \quad (6.6)$$

L'equació 6.6 contribueix en els dos primers coeficients de Fourier,  $C_0$  i  $C_1$ . De fet, en aquest cas també tots els altres coeficients tenen valor zero.

Donat un angle  $\theta_e$ ,  $V_{x0}$ ,  $V_{y0}$ ,  $Vf$ ,  $r$  i  $\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y}$ , la velocitat radial esdevindrà una sinusoide amb un desfasament igual a l'angle de direcció del vent i un offset degut a la divergència.

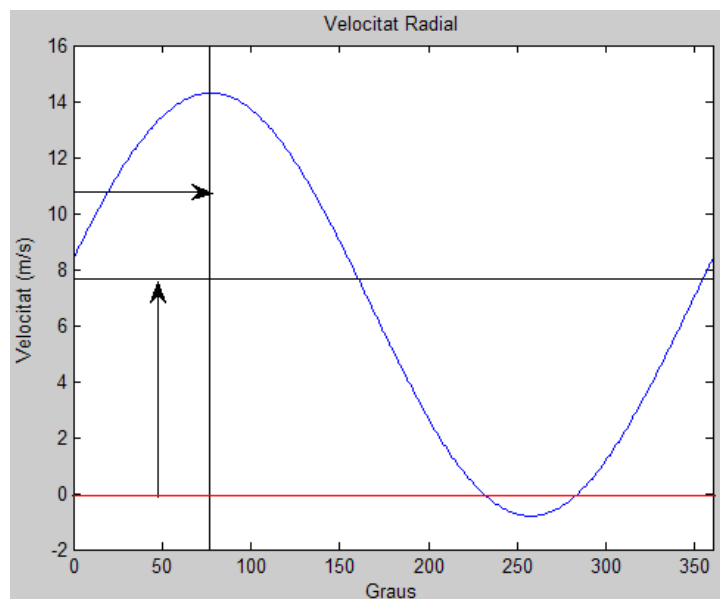
La velocitat del vent, direcció i divergència es dedueixen a partir de l'estimació espectral de la velocitat radial. Tot i que hi ha un número finit de mostres, el mètode convencional durant últims anys és la TF com estimador. Aplicarem, doncs, diferents mètodes no paramètrics per observar si obtenim una millor precisió de les dades d'interès.

#### Primer escenari- SNR alt

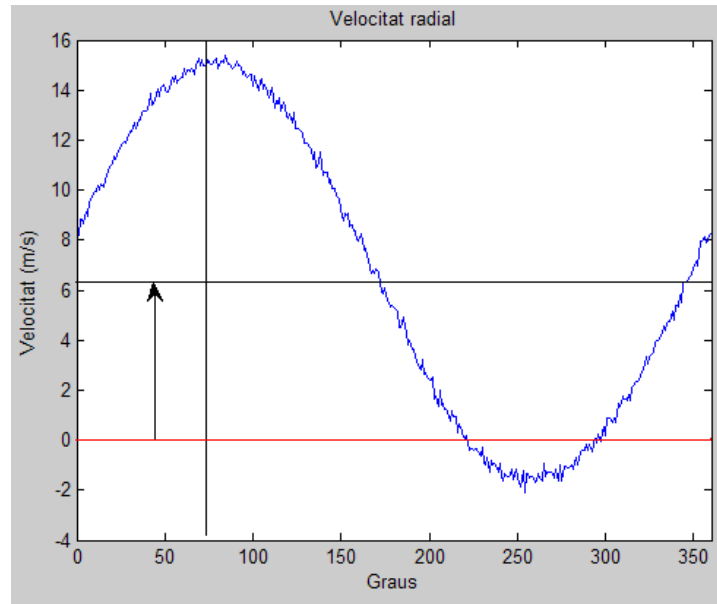
Posem el cas:

$V_{x0}=2$  m/s ,  $V_{y0}=9$  m/s,  $\theta_e = 35^\circ$  ,  $Vf =10$  m/s , radi=1 Km, i divergència de  $3 \cdot \text{sec}^{-1}$ .

Aconsegum:



**Figura 64- Velocitat radial pel primer escenari**



**Figura 65- Velocitat radial amb soroll pel primer escenari**

❖ Mètode Transformada de Fourier

S'aplica la TF als 100 vectors  $V_r$  i a continuació es fa el promig. El coeficient  $C_1$  val  $0,8829 - 4,0803i$ . Per comprovar que la TF és un bon estimador, substituïm el coeficient  $C_1$  a l'equació 6.3 i 6.4. I aïllem,

$$V_{x0} = 2,155 \text{ m/s}$$

$$V_{y0} = 9,962 \text{ m/s}$$

Observem que els valors obtinguts són quasi bé els mateixos que els introduïts. D'aquesta manera comprovem que té relació el què introduïm amb els resultats. Calculem la velocitat i direcció,

$$V_h = \frac{2|C_1|}{\cos \theta_e} = 10,1934 \text{ m/s}$$

$$D = \arg C_1 - \pi = 67,79^\circ$$

El coeficient  $C_0$  val  $\frac{2,4245 \cdot 10^3}{360}$ . En el cas anterior es multiplicava la TF per un factor

2, però la TF d'un pols finit, o una recta, és simplement una delta, de manera que no cal multiplicar-lo. Substituïm el coeficient  $C_0$  a l'equació 4.22. La velocitat radial deguda a divergència és de 6,7347 m/s. I la divergència és:

$$Div = \frac{2}{r \cos^2 \theta_e} (C_0 - Vf \sin \theta_e) = 2,9790/s$$

De manera que la velocitat representada a la figura 54 serà la suma de les dos contribucions, per una part, la contribució d'un vent horitzontal i per l'altre, d'un vent divergent.

$$V_h = 16,9281 \text{ m/s}$$

## ❖ Mètode Periodograma

Amb aquest mètode, els coeficients estan en forma de potència (elevat al quadrat). Per extreure el valor de  $C_0$  cal fer l'arrel d'aquest.

$$C_1 = \frac{\sqrt{2,2672 \cdot 10^6}}{360} = 4,1825$$

$$V_h = \frac{2|C_1|}{\cos \theta_e} = 10,2124 \text{ m/s}$$

La divergència és:

$$C_0 = \frac{\sqrt{5,8818 \cdot 10^6}}{360} = 6,7367$$

$$Div = \frac{2}{r \cos^2 \theta_e} (C_0 - V_f \sin \theta_e) = 2,9831/s$$

De manera que la velocitat representada a la figura 64 serà la suma de les dos contribucions, per una part, la contribució d'un vent horitzontal i per l'altre, d'un vent divergent.

$$V_h = 16,9491 \text{ m/s}$$

## ❖ Mètode Bartlett

Bartlett necessita varis vectors  $V_r$  per fer la mitja. De moment agafem 500.

$$\text{Segon 1} = 2,2672 \cdot 10^6$$

$$\text{Segon 2} = 2,2672 \cdot 10^6$$

$$\text{Segon 3} = 2,2672 \cdot 10^6$$

$$\text{Segon 4} = 2,2672 \cdot 10^6$$

$$\text{Segon 5} = 2,2672 \cdot 10^6$$

.

.

.

$$\text{Segon 500} = 2,2672 \cdot 10^6$$

El coeficient  $C_0$  és la mitja dels 5 segons, i té el valor  $2,2672 \cdot 10^6$ .

Velocitat radial:

$$C_1 = \frac{\sqrt{2,2672 \cdot 10^6}}{360} = 4,1825$$

$$V_h = \frac{2|C_1|}{\cos \theta_e} = 10,2124 \text{ m/s}$$

Divergència:

$$C_0 = \frac{\sqrt{5,8818 \cdot 10^6}}{360} = 6,7367$$

$$Div = \frac{2}{r \cos^2 \theta_e} (C_0 - Vf \sin \theta_e) = 2,9831/s$$

Sumem les dos contribucions:

$$V_h = 10,2124 + 2,9831 = 13,1955 \text{ m/s.}$$

#### ❖ Mètode Blackman-Tukey

Blackman-Tukey aplica la TF a l'autocorrelació prèviament multiplicada per una finestra Hamming. La velocitat radial és:

$$C_1 = \frac{\sqrt{3,7224 \cdot 10^6}}{719} = 2,6834$$

$$V_h = \frac{2|C_1|}{\cos \theta_e} = 9,0971 \text{ m/seg}$$

Divergència:

$$C_0 = \frac{4,218 \cdot 10^3}{719} = 5,8664$$

$$Div = \frac{2}{r \cos^2 \theta_e} (C_0 - Vf \sin \theta_e) = 6,7357/s$$

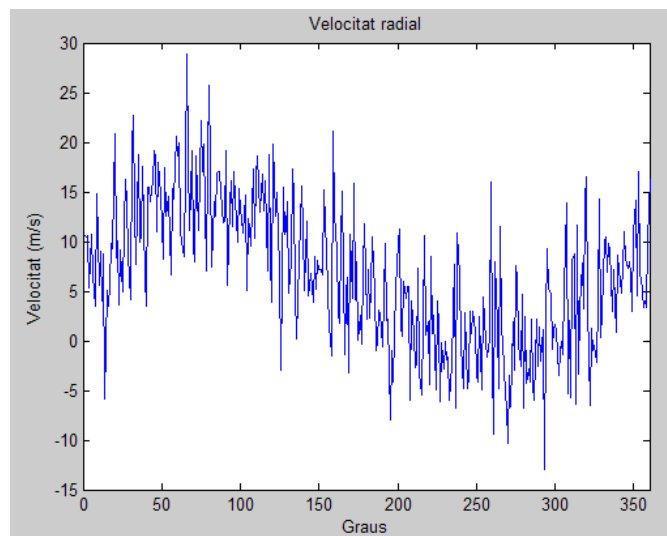
Sumem les dos contribucions:

$$V_h = 15,832 \text{ m/s.}$$

#### Segon escenari- SNR baix

Posem el cas:

$V_{x0} = 2 \text{ m/s}$ ,  $V_{y0} = 9 \text{ m/s}$ ,  $\theta_e = 35^\circ$ ,  $Vf = 10 \text{ m/s}$ ,  $\text{radi} = 1 \text{ Km}$ ,  $\theta_e = 35^\circ$  i divergència de  $3 \cdot \text{sec}^{-1}$ . En aquest escenari el canal gaussià introdueix molt de soroll. La velocitat radial serà:



**Figura 66- Velocitat radial amb soroll pel segon escenari**

### ❖ Mètode Transformada de Fourier

S'aplica la TF als 100 vectors  $V_r$  i a continuació es fa el promig . El coeficient  $C_1$  val  $1,0412 - 3,594i$ . Per comprovar que la TF és un bon estimador, substituïm el coeficient  $C_1$  a l'equació 6.3 i 6.4.

Aïllem,

$$V_{x0} = 2,542 \text{ m/s}$$

$$V_{y0} = 8,775 \text{ m/s}$$

Observem que els valors obtinguts són quasi bé els mateixos que els introduïts. D'aquesta manera comprovem que té relació el què introduïm amb els resultats. Calculem la velocitat i direcció,

$$V_h = \frac{2|C_1|}{\cos \theta_e} = 9,3136 \text{ m/s}$$

$$D = \arg C_1 - \pi = 60,28^\circ$$

El coeficient  $C_0$  val  $\frac{2,3847 \cdot 10^3}{360}$ . En el cas anterior es multiplicava la TF per un factor 2, però la TF d'un pols finit, o una recta, és simplement una delta, de manera que no cal multiplicar-lo. Substituïm el coeficient  $C_0$  a l'equació 4.22. La velocitat radial deguda a divergència és de 6,6241 m/s. La divergència és:

$$Div = \frac{2}{r \cos^2 \theta_e} (C_0 - Vf \sin \theta_e) = 2,6476/s$$

De manera que la velocitat representada a la figura 64 serà la suma de les dos contribucions, per una part , la contribució d'un vent horitzontal i per l'altre, d'un vent divergent.

$$V_h = 15,9377 \text{ m/s}$$

### ❖ Mètode Periodograma

Amb aquest mètode, els coeficients estan en forma de potència (elevat al quadrat). Per extreure el valor de  $C_0$  cal fer l'arrel d'aquest.

$$C_0 = \frac{\sqrt{5,6868 \cdot 10^6}}{360} = 6,6241$$

La divergència és,

$$Div = \frac{2}{r \cos^2 \theta_e} (C_0 - Vf \sin \theta_e) = 2,6486/s$$

La velocitat radial serà:

$$C_1 = \frac{\sqrt{1,8145 \cdot 10^6}}{360} = 3,7417$$

$$V_h = \frac{2|C_1|}{\cos \theta_e} = 9,1362 \text{ m/s}$$

De manera que la velocitat representada a la figura 64 serà la suma de les dos contribucions, per una part , la contribució d'un vent horitzontal i per l'altre, d'un vent divergent.

$$V_h = 15,3772 \text{ m/s}$$

❖ Mètode Bartlett

S'agafa 500 vectors  $V_r$  , per després fer la mitja.

$$\text{Segon 1} = 1,8145 \cdot 10^6$$

$$\text{Segon 2} = 1,8145 \cdot 10^6$$

$$\text{Segon 3} = 1,8145 \cdot 10^6$$

$$\text{Segon 4} = 1,8145 \cdot 10^6$$

$$\text{Segon 5} = 1,8145 \cdot 10^6$$

·  
·  
·

$$\text{Segon 500} = 1,814 \cdot 10^6$$

El coeficient  $C_0$  és la mitja dels 5 segons, i té el valor  $1,8145 \cdot 10^6$  .

La velocitat radial serà,

$$C_1 = \frac{\sqrt{1,8145 \cdot 10^6}}{360} = 3,7417$$

$$V_h = \frac{2|C_1|}{\cos \theta_e} = 7,4909 \text{ m/s}$$

Calculem la divergència,

$$C_0 = \frac{\sqrt{5,6868 \cdot 10^6}}{360} = 6,6241$$

$$Div = \frac{2}{r \cos^2 \theta_e} (C_0 - Vf \sin \theta_e) = 2,7923/s$$

De manera que la velocitat representada a la figura 64 serà la suma de les dos contribucions, per una part , la contribució d'un vent horitzontal i per l'altre, d'un vent divergent.

$$V_h = 14,115 \text{ m/s}$$

# ❖ Mètode Blackman-Tukey

Blackman-Tukey aplica la TF a l'autocorrelació prèviament multiplicada per una finestra Hamming.

$$C_0 = \frac{\sqrt{3,83763 \cdot 10^6}}{719} = 2,7246$$

$$Div = \frac{2}{r \cos^2 \theta_e} (C_0 - Vf \sin \theta_e) = 8,9747 \text{ /seg.}$$

$$C_1 = \frac{2,623 \cdot 10^3}{719} = 3,6439$$

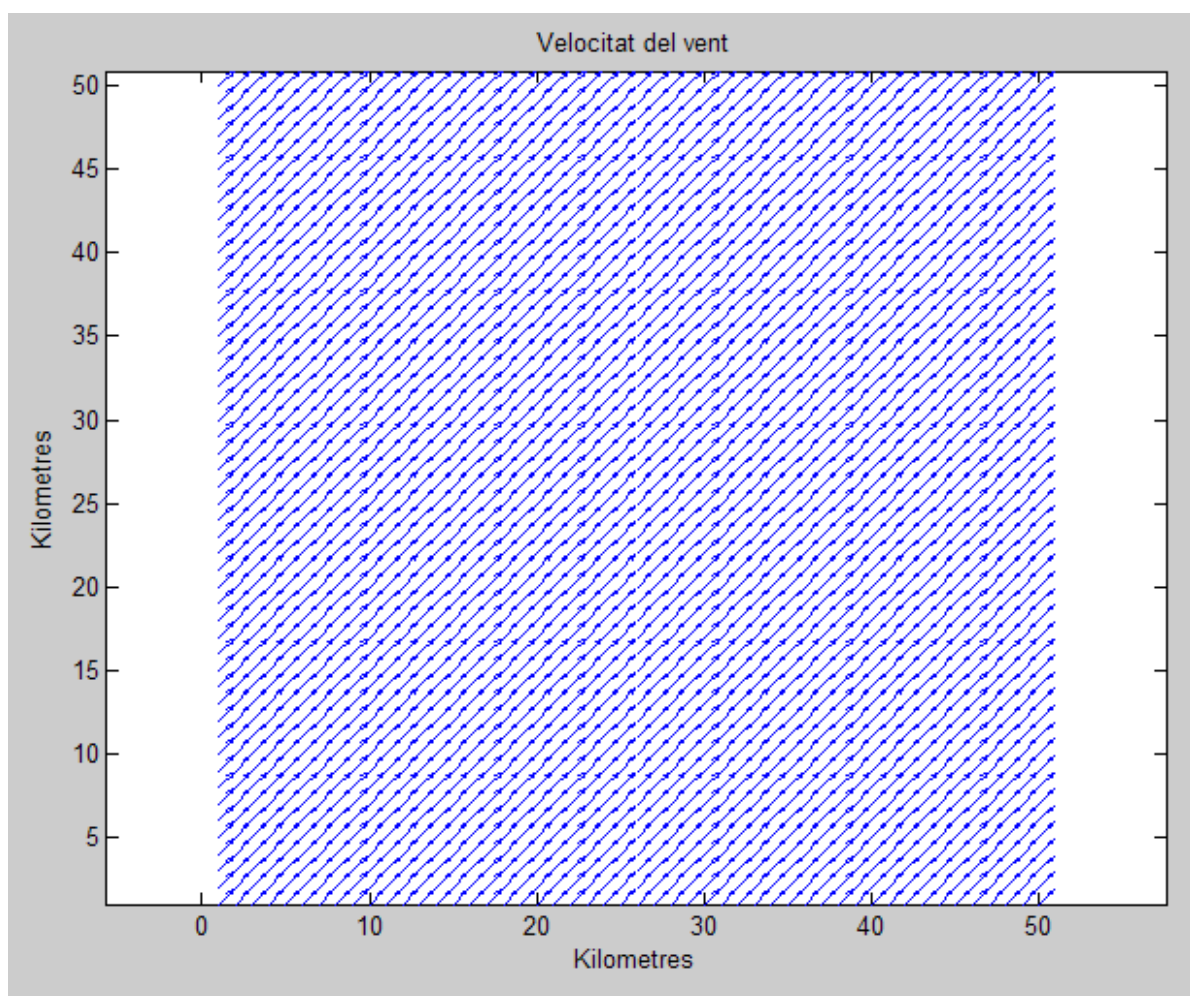
$$V_h = \frac{2|C_1|}{\cos \theta_e} = 4,5925 \text{ m/seg.}$$

La velocitat representada a la figura 64 serà la suma de les dos contribucions, per una part, la contribució d'un vent horitzontal i per l'altre, d'un vent divergent.

$$V_h = 13,567 \text{ m/s}$$

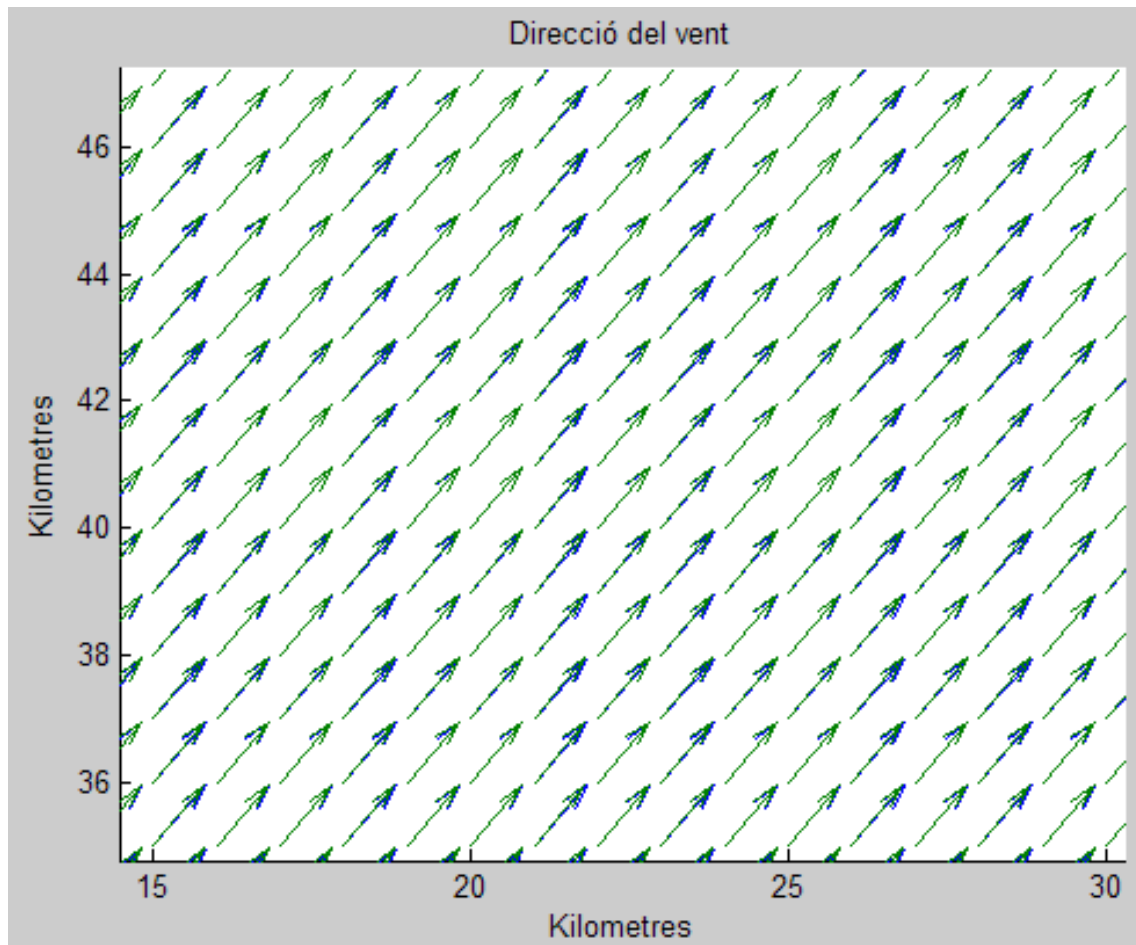
### 6.1.4 Representació gràfica dels mapes eòlics

Un cop realitzat el processament dels senyals rebuts pel radar, i obtingudes les variables de direcció, mòdul del vent i divergència, el bloc Display (presentat a l'apartat 6.1.1), de la branca superior i de la branca inferior, il·lustra els mapes. A continuació es mostren els diferents mapes en presència o no de soroll al canal per poder comparar el que es desitja tenir amb el que s'obté, i saber si els mapes representats s'allunyen o no de la realitat.



**Figura 67- Mapa de la direcció del vent**





**Figura 68- Mapa de la direcció del vent**

A la figura 68 hi està representat la direcció del vent a través de fletxes, de color blau, que surten del bloc Display on no hi ha soroll i fletxes verdes obtingudes amb presència de soroll. Podem comprovar que la diferència és mínima, igual que a la figura 69 i 70.

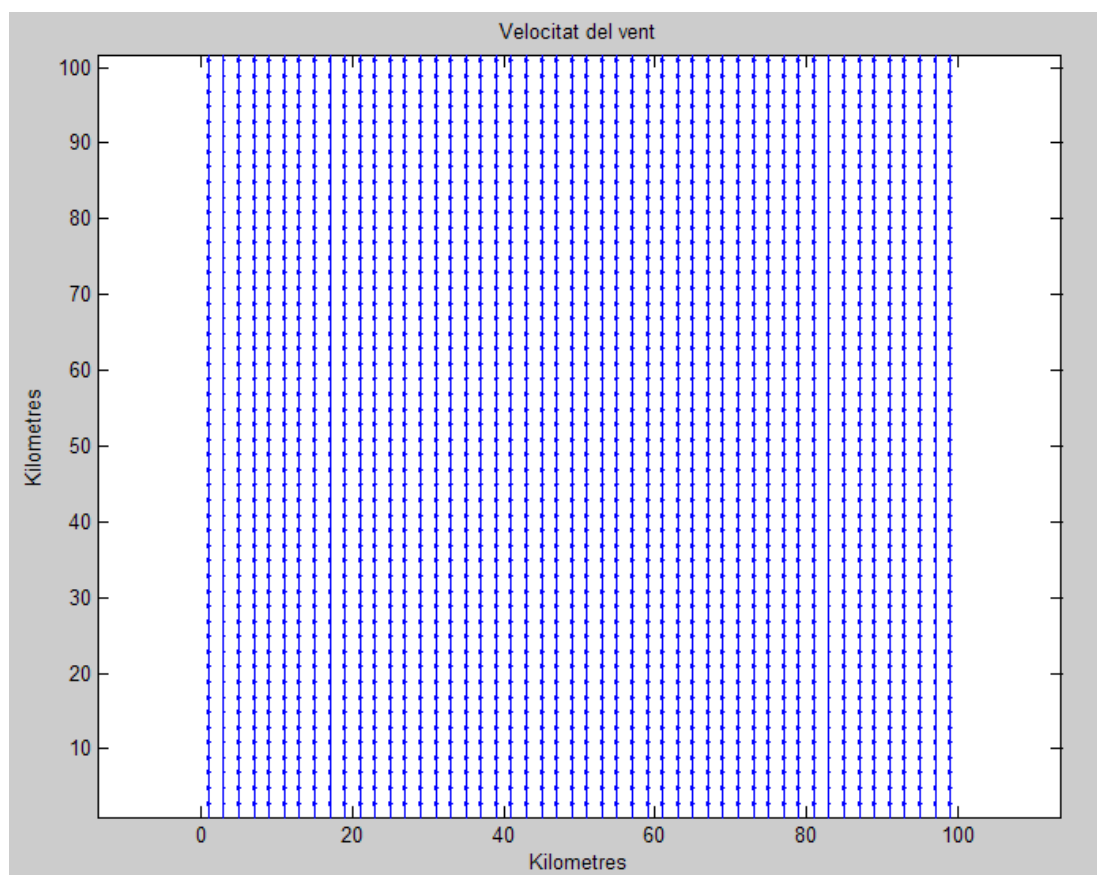


Figura 69- Mapa de la direcció del vent

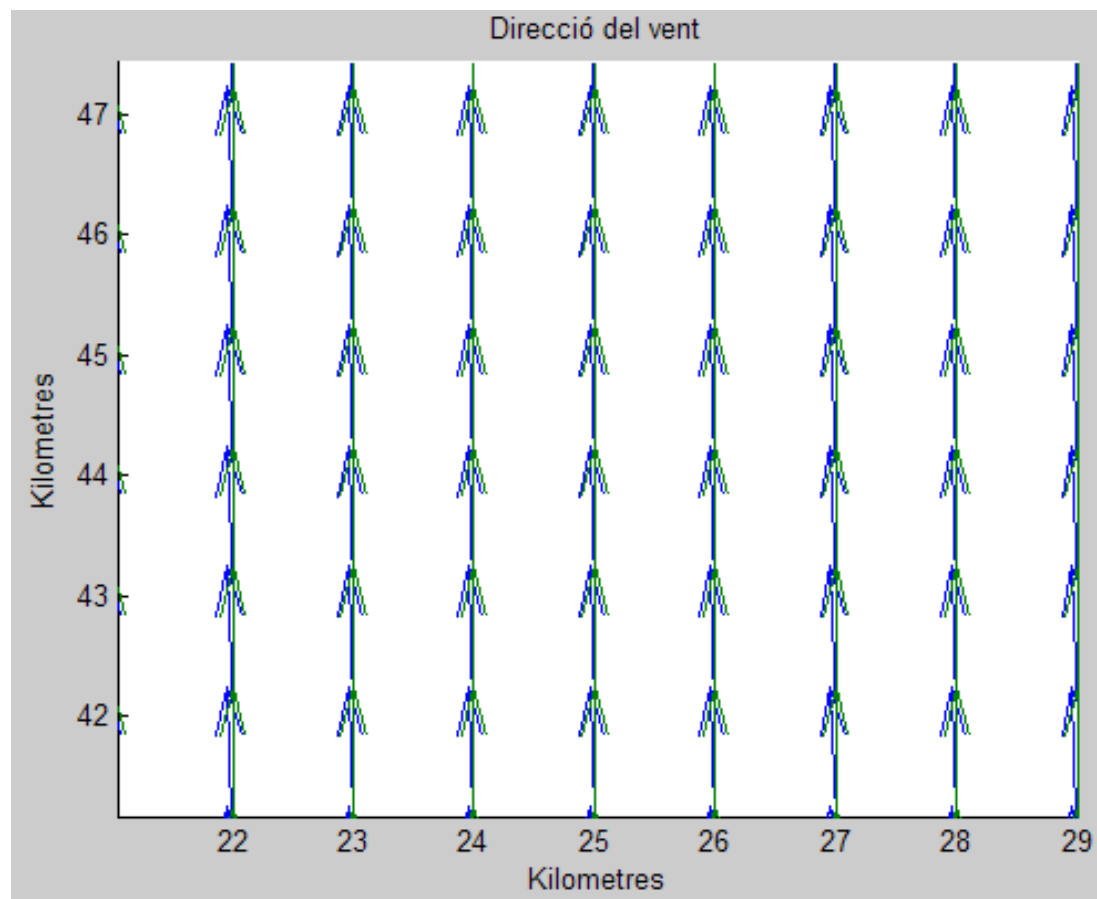
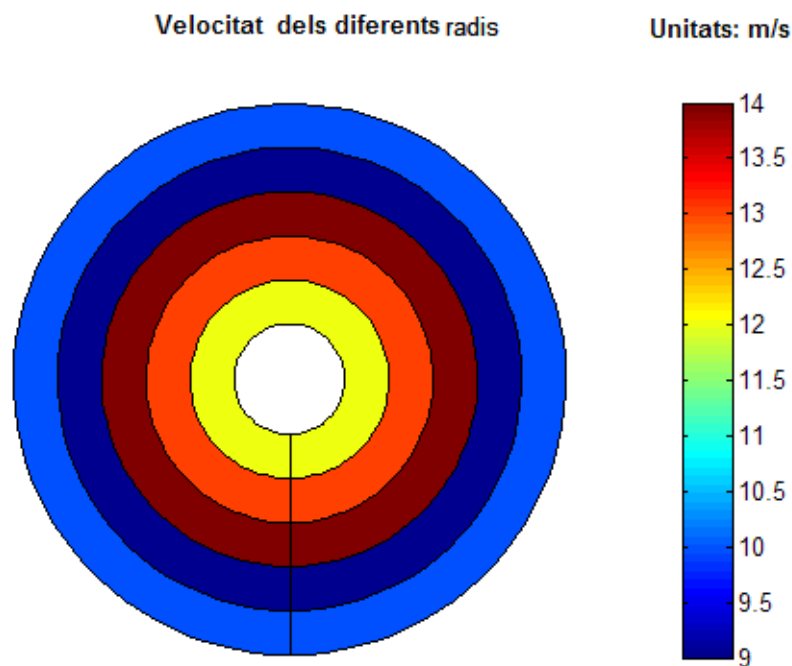


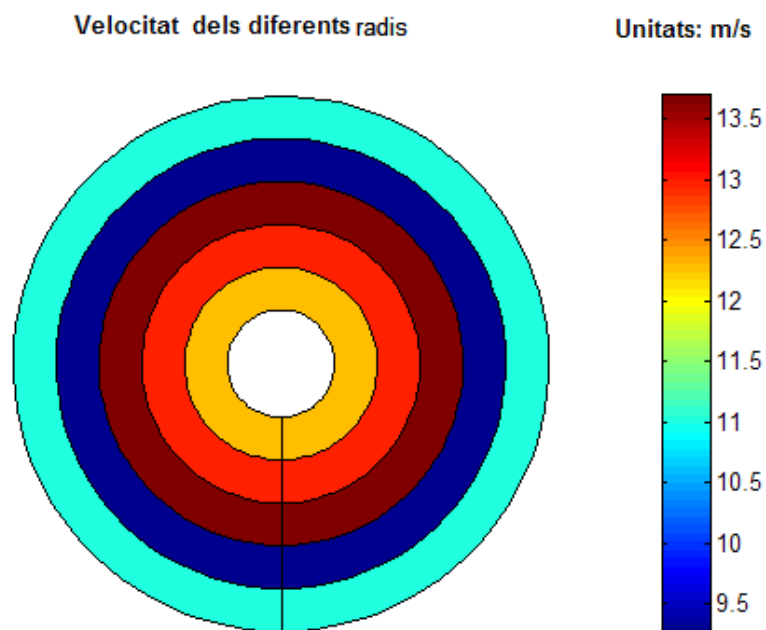
Figura 70- Mapa de la direcció del vent

Per representar el mòdul de la velocitat radial segons els radis escanejats pel VAD, s'ha creat el següent mapa ja que dóna una idea molt clara de la variable. Els colors càlids representen velocitats més fortes que la dels colors freds.

La figura 71 representa la velocitat de sortida del bloc Display sense presència de soroll (representada a la branca inferior de la figura 45); i la figura 72 és la velocitat donada pel bloc Display amb presència de soroll (representada a la branca superior). La diferència entre les magnituds d'aquestes dues figures és més gran que la del cas anterior.

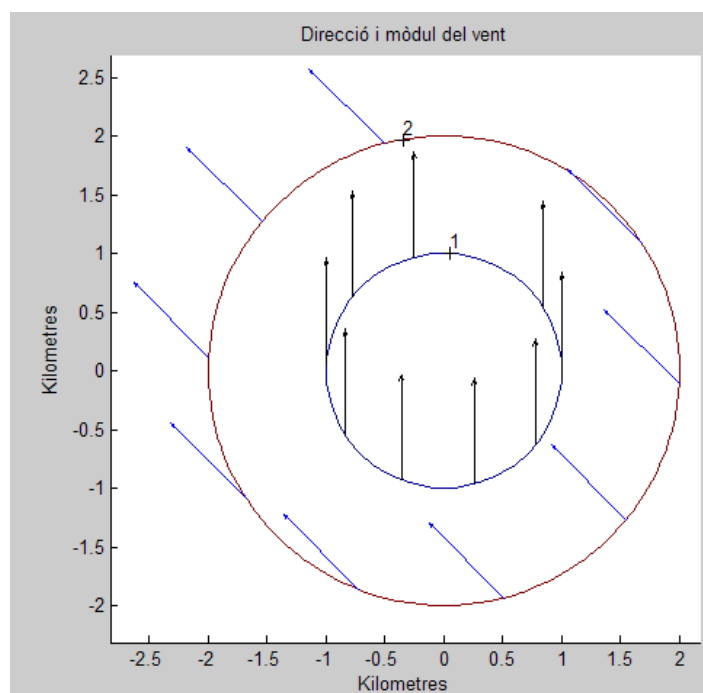


**Figura 71- Mapa de la velocitat per cada radi**



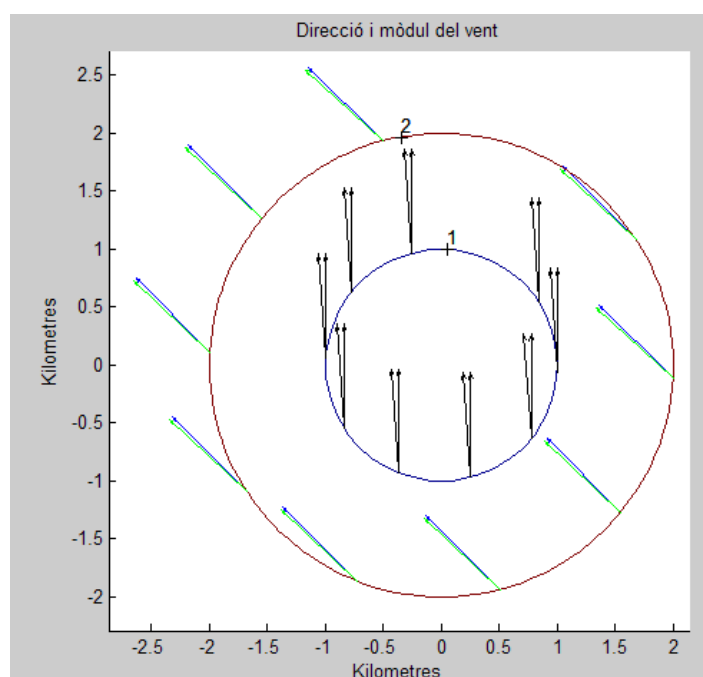
**Figura 72- Mapa de la velocitat per cada radi**

El següent mapa presenta la direcció i mòdul del vent en funció de cada radi escanejat. S'interpreta, de la figura 73, que en el radi de 1 km hi ha una velocitat de 10 m/s amb una direcció de  $45^\circ$  i el radi de 2 Km té una velocitat de 2 m/s amb una direcció de  $115^\circ$ .



**Figura 73- Mapa de la direcció i velocitat en funció del radi**

A la figura 74 s'hi representa sobreposat la velocitat i direcció de dos radis dels dos blocs Display. En el primer radi, idealment hauria de tenir una direcció de  $90^\circ$  i un mòdul de 10 m/seg., en canvi tenim una direcció de  $91^\circ$  i un mòdul de 10m/seg. Al segon radi, si no hi hagués soroll s'obtindria una direcció de  $135^\circ$  i un mòdul de 6m/seg., tot i que al final s'obté una direcció de  $136^\circ$  i un mòdul de 6,5m/seg.



**Figura 74- Mapa de la direcció i velocitat en funció del radi**

## Capítol VII: Conclusions

Ara ens centrarem en examinar els resultats de les simulacions fetes al capítol VI, i determinarem el mètode que aporti una millora en l'estimació de la velocitat, direcció i divergència del vent, tot mirant la variància.

Les simulacions s'han fet per cada tipus de vent, ja sigui: de component horitzontal, divergent o ambdós. Per cadascun d'aquest escenaris plantejats s'ha introduït més o menys potència de soroll, altrament dit SNR, per veure com es comporten.

En el mètode de Blackman-Tukey s'ha utilitzat a part de la finestra Hamming, la finestra Bartlett i Blackman, d'aquesta manera es pot veure quina d'aquestes tres aporta una millora més gran.

### Resultats per vents de component horitzontal

#### SNR-alta

La velocitat radial és 12,8 m/s

	$V_h$ (m/s)	Error (m/s)
Transformada de Fourier	15,4223	2,622
Periodograma	15,6256	2,825
Bartlett	15,2188	2,418
Blackman-Tukey, Finestra Hamming	12,3303	0,4697
Blackman-Tukey, Finestra Bartlett	11,4117	1,388
Blackman-Tukey, Finestra Blackman	12,8027	0,0027

Taula 4- Velocitats per els diferents mètodes amb una SNR alta

### SNR-baixa

La velocitat radial real és 7,59 m/s

		$V_h$ (m/s)	Error ( $s^{-1}$ )
Transformada de Fourier		9,3631	1,773
Periodograma		8,8573	1,267
Bartlett		9,2296	1,639
Blackman-Tukey, Hamming	Finestra	5,13874	2,451
Blackman-Tukey, Bartlett	Finestra	4,1788	3,411
Blackman-Tukey, Blackman	Finestra	4,3895	3,200

Taula 5- Velocitats per els diferents mètodes amb una SNR baix

Per les diferents realitzacions de cada mètode obtenim un valor de velocitat representat a la figura 75. La línia blava continua és el valor que hauria de tenir la velocitat si no hi hagués soroll.

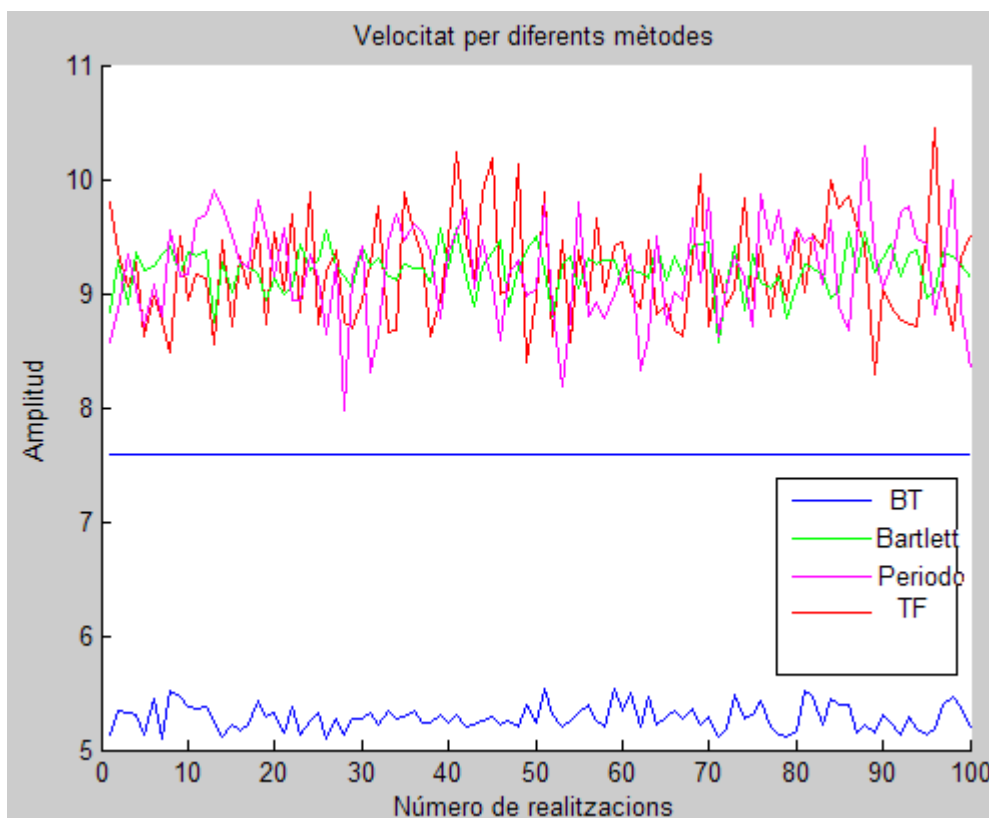


Figura 75- Velocitat del vent horitzontal per diferents mètodes

### Resultats per vents divergents

#### SNR-alta

La divergència real és  $3 \text{ s}^{-1}$

	<i>Div</i> ( $\text{s}^{-1}$ )	Error ( $\text{s}^{-1}$ )
Transformada de Fourier	2.9998	2e-4
Periodograma	2.9998	2e-4
Bartlett	2.9999	1e-4
Blackman-Tukey,Finestra Hamming	2,9805	19,5e-3
Blackman-Tukey,Finestra Bartlett	2,9854	14,6e-3
Blackman-Tukey,Finestra Blackman	2,9938	6,2e-3

Taula 6- Divergència per els diferents mètodes amb una SNR alta

#### SNR-baixa

La divergència real és  $10 \text{ s}^{-1}$

	<i>Div</i> ( $\text{s}^{-1}$ )	Error ( $\text{s}^{-1}$ )
Transformada de Fourier	6,7099	3,2901
Periodograma	6,0838	3,9162
Bartlett	6,7234	3,2766
Blackman-Tukey,Finestra Hamming	10,8842	0,8842
Blackman-Tukey,Finestra Bartlett	9,2285	0,7715
Blackman-Tukey,Finestra Blackman	5,9133	4,0867

Taula 7- Divergència per els diferents mètodes amb una SNR baix

La figura 76 representa en diferents colors els valors que agafa la velocitat, depenen del estimador, per diferents realitzacions. La línia blava continua és el valor que hauria de tenir la velocitat dels diferents mètodes si no hi hagués soroll.

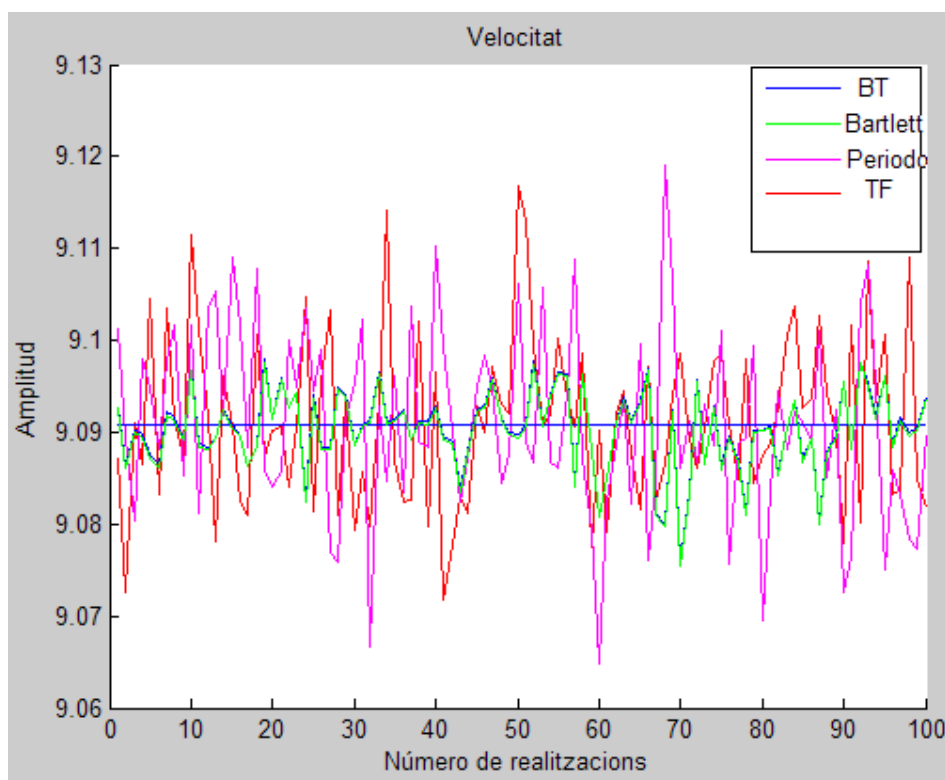


Figura 76- Velocitat del vent divergent per diferents mètodes

### Resultats per vents de component horitzontal i divergent

#### SNR-alta

La divergència real és de  $3 \text{ s}^{-1}$  i la velocitat radial és  $14,75 \text{ m/s}$

	$V_h$ (m/s)	Error de la velocitat (m/s)	Div ( $\text{s}^{-1}$ )	Error de la Div ( $\text{s}^{-1}$ )
Transformada de Fourier	16,9281	2,1781	2,9790	0,021
Periodograma	16,9491	2,1991	2,9831	0,0169
Bartlett	13,1955	1,5545	2,9831	0,0169
Blackman- Tukey,Finestra Hamming	15,832	1,0825	6,7357	3,7357
Blackman- Tukey,Finestra Bartlett	15,7634	1,0134	4,2915	1,2915
Blackman- Tukey,Finestra Blackman	14,7513	0,0013	3,0172	0,0172

Taula 8- Velocitat i divergència per els diferents mètodes amb una SNR alta



### SNR-baixa

La divergència real és de  $3 \text{ s}^{-1}$  i la velocitat radial és  $14,75 \text{ m/s}$

	$V_h$ (m/s)	Error de la velocitat (m/s)	Div ( $\text{s}^{-1}$ )	Error de la Div ( $\text{s}^{-1}$ )
Transformada de Fourier	15,9357	1,1857	2,6476	0,3524
Periodograma	15,377	0,627	2,6486	0,3514
Bartlett	14,115	0,635	2,7923	0,2077
Blackman- Tukey,Finestra Hamming	13,567	1,183	8,9747	5,9747
Blackman- Tukey,Finestra Bartlett	14,827	0,077	6,793	3,7937
Blackman- Tukey,Finestra Blackman	14,534	0,216	3,251	0,25

Taula 9- Velocitat i divergència per els diferents mètodes amb una SNR baixa

Per les diferents realitzacions de cada mètode obtenim un valor de velocitat representat en diferents colors a la figura 77. La línia blava continua és el valor que hauria de tenir la velocitat dels diferents mètodes si no hi hagués soroll.

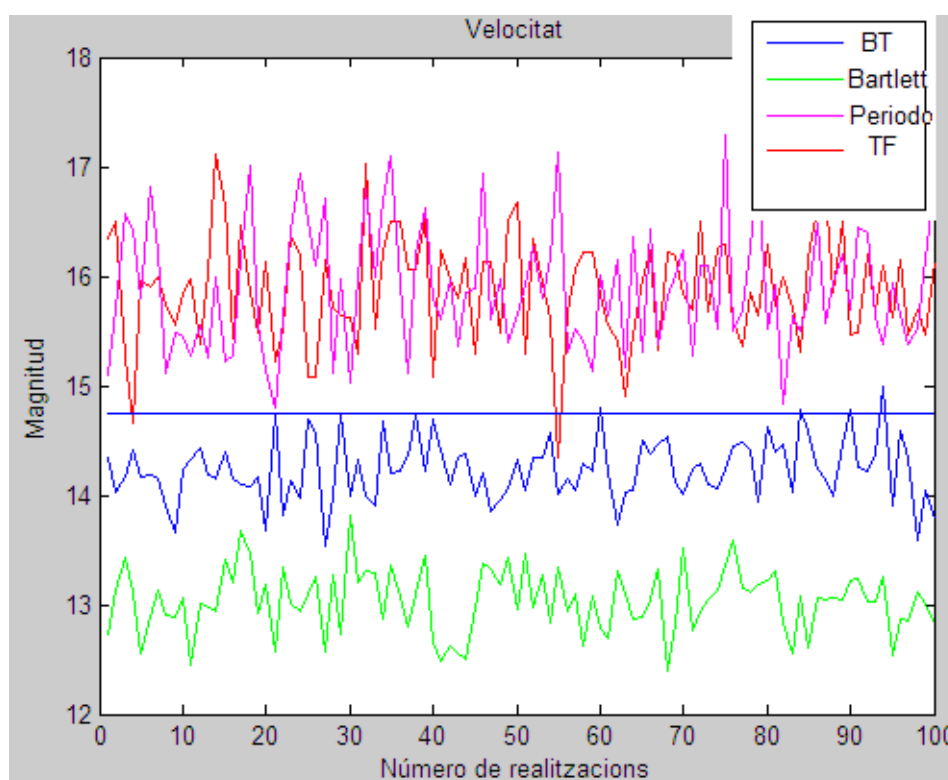


Figura 77- Velocitat del vent divergent i horitzontal per diferents mètodes

Pel que fa a la direcció del vent, no s'han proposat diferents estimadors per dues raons, la primera és que la TF és prou precisa, de manera que si utilitzem un altre mètode, la millora que es pot obtenir seria petita; la segona raó és que tant el Periodograma, Bartlett i Blackman-Tukey calculen potència, per tant no és possible trobar els coeficients  $a_1$  i  $b_1$ .

## 7.1 Conclusió de les simulacions

En aquest projecte s'ha analitzat l'obtenció i la representació de la velocitat radial del radar VAD en dos entorns: en presència de soroll de molta potència o de poca potència.

L'estudi recau en veure quin estimador dels proposats: Periodograma, Bartlett i Blackman-Tukey, té més robustesa i menys variància. Aquest factor ens serveix per determinar quin estimador escollim com a el millor. Per exemple, un estimador que té una velocitat mitjana semblant a la real però té una variància molt elevada, no serà un mètode molt fiable. Tant la figura 75, 76 i 77 representen les velocitats obtingudes amb un canal que introdueix molt de soroll, i fan referència als escenaris de SNR baixa. S'utilitzen aquests escenaris pels tres tipus de vent ja que a la realitat la potència de soroll és considerable.

Les taules 4, 5, 6, 7, 8 i 9 compacten els resultats obtinguts als apartats 6.1.3.1, 6.1.3.2 i 6.1.3.3 per poder visualitzar amb un cop d'ull quins valor s'obtenen a partir dels diferents estimadors. Mirant aquestes taules es podria triar l'estimador que s'acosti més a la velocitat real, presentada amb una línia contínua, però per veure ben bé quin d'aquests estimadors és el més estable, hem d'utilitzar les gràfiques 75, 76 i 77.

En el primer cas de vents horitzontals, observem a la gràfica 75 els diferents valors per realització que pot tenir la velocitat. Els estimadors TF, Periodograma i Bartlett són els que s'aproximen més a la velocitat real, tot i que l'estimador Blackman-Tukey té menys variància.

En el segon cas de vents divergents, observem a la gràfica 76 que els quatre estimadors no difereixen gaire del valor real, no obstant Bartlett i Blackman-Tukey són els que tenen menys variància.

En el tercer cas de vents horitzontals i divergents, tant el Periodograma, la TF i Blackman-Tukey s'aproximen al valor real, però el que representa menys variància és l'estimador Blackman-Tukey.

Per tant, podem concloure que per a vents horitzontals i divergents, que són els que realment es troben a la pràctica, el mètode Blackman-Tukey dona una millora respecte la variància i el mòdul de la velocitat del vent.

Aplicant aquest mètode de processat a un radar VAD s'aconsegueix que la velocitat obtinguda a cada rotació sigui la més precisa ja que no diferirà gaire de la realitat, i això provocarà que els radars VAD, aplicant el mètode Blackman-Tukey, siguin d'una gran importància ens els parcs eòlics marítims per controlar la velocitat de rotació de les turbines dels aerogeneradors i també per a obtenir mapes per activitats marítimes.

## Referències

- [1]L. Armijo, “A theory for the determination of wind and precipitation velocities with Doppler radars,” J. Atmos. Sci., vol. 26pp. 570-573,1969.
- [2]L. J. Battan, “Some observations of vertical velocities and precipitation sizes in a thunderstorm,” J. Appl. Meteorol., vol. 3, pp. 41 5420,1964.
- [3] “Radar Observation of the Atmosphere”. Chicago, IL: Univ. Chicago Press, 1973.
- [4]M. I. Berger and R. J. Doviak, “Dual Doppler-radar observations of wind fields in a dry convective boundary layer,” in Preprints Fourth Symp. Meteorol. Observ. Instru., Denver, CO Amer. Meteorol. SOC., Boston, MA pp. 219-226, 1978.
- [5]K. A. Browning and R. Wexler, “A determination of kinematic properties of a wind field using Doppler-radar,” J. ApplMeteorol., vol. 7 no. 2, pp. 105-1 13, 1968.
- [6]P. A. F. Caton, “Wind measurement by Doppler radar,” Meteorol. Mag.,vol. 92, pp. 213-222, 1963.
- [7]P. L. Smith, Jr., K. R. Hardy, and K. M. Glover, “Applications of radar to meteorological operations and research,” Proc. ZEEE vol. 62, pp. 724-745, June 1974.
- [8]S. L. Hess, Introduction to Theoretical Meteorology. New (691 J. J. Hicks and J. K. Angell, “Radar observations of breaking York: Holt, Rinehart, and Winston, 1959.
- [9]M.H. Hayes, “Statistical digital signal processing and modeling”.
- [10]“12MW Horns Rev Experiment”Riso.
- [11] Rogw M. Lhermitte, “Measurement of wind and wind field by microwave doppler radar techniques”,Atmospheric Environment Pergamon Press 1971. Vol. 5, pp. 691-702.
- [12]Richard J. Doviak, Dusan S. Zrnic, Dale S. Sirmans, ”Doppler Weather Radar”, Proceedings of the IEEE, VOL. 67, NO. 11, NOVEMBER 1979.
- [13] Richard J. Doviak, Dusan S. Zrnic,,”Doppler Radar and Weather Observation” 2nd edition. Academic Press: San Diego.

- [14]Lhermitte RM, Atlas D. 1961. "Precipitation motion by pulse Doppler radar". Pp 218–223 in Proceedings of the 9th Weather Radar Conference, Kansas City, 23–26 October 1961. American Meteorological Society: Kansas City, Missouri, USA.
- [15]Salonen K, Järvinen H, Lindskog M. 2003. "Model for Doppler radar radial winds". Pp 142–145 in Proceedings of the 31st Conference on Radar Meteorology, volume 1, Seattle, 6–12 August 2003. American Meteorological Society: Seattle, Washington, USA.
- [16] "RADAR: Velocity Analysis Version", Central Amit Aggarwal Erlend Hansen.
- [17] "Two-Dimensional Vector Wind Fields from Volume Imaging Lidar Data" Shane D. Mayor and Edwina W. Eloranta, Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, University of Wisconsin.
- [18] "Impact of Assimilation of Doppler Radial Velocity on a Variational System and on its Forecasts Fathalla" A. Rihana, Chris G. Collier & Sue P. Ballard.
- [19]L. Hennington, R. J. Doviak, D. Sirmans, D. Zmii, and R. G Strauch, "Measurements of winds in the optically clear air with microwave pulse-Doppler radar," in Preprints 17th Conf Radar Meteorol., Amer. Meteorol. SOC., Boston, MA, pp. 342-348, Oct 1976.
- [20]J. Q. Brantley and D. A. Barczys, "Some weather observations Radar Conf., Amer. Meteorol. Soc., Boston, MA. 02108, pp. with continuous wave Doppler radar," in Proc. 6th Weather 297-306, 1957.
- [21]D. Atlas, R. C. Srivastava, and R. S. Sekhon, "Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence," Rev. Geophys. Space Phys. vol. 2, pp. 1-35, 1973.
- [22] B. B. Balsley, "The use of sensitive coherent radars to examine Preprints 18th Conf. Radar Meteorol., Amer. Meteorol. SOC., atmospheric parameters in the height range 1-100 km,".
- [23]B. B. Balsley, N. Chasnov, D. T. Farley, and M. J. Baron, "Winds Boston, MA 02108, pp. 190-193, Mar. 1978. derived from radar measurements in the arctic troposphere and stratosphere," J. Appl. Meteorol., vol. 16, pp. 1235-1239.
- [24]D. Atlas, "Radar analysis of severe storms," Meteorol. Monographs, Amer. Meteorol. SOC., Boston, MA, 02108, vol. 5.
- [25] "Advances in radar meteorology," in Advances in Geophysics, Landsberg and Mieghem, Eds. New York: Academic.